

PCT/JP 2004/010232

24. 9. 2004

日 本 国 特 許 庁  
JAPAN PATENT OFFICE

REC'D 11 NOV 2004

別紙添付の書類に記載されている事項は下記の出願書類に記載され  
いる事項と同一であることを証明する。

This is to certify that the annexed is a true copy of the following application as filed with this Office.

出 願 年 月 日            2 0 0 4 年 . 3 月    5 日  
Date of Application:

出 願 番 号            特 願 2 0 0 4 - 0 6 3 2 6 0  
Application Number:  
[ST. 10/C]:            [ J P 2 0 0 4 - 0 6 3 2 6 0 ]

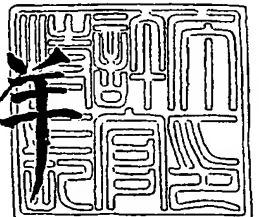
出    願    人            日 本 板 硝 子 株 式 会 社  
Applicant(s):

**PRIORITY DOCUMENT**  
SUBMITTED OR TRANSMITTED IN  
COMPLIANCE WITH  
RULE 17.1(a) OR (b)

2 0 0 4 年 1 0 月 2 9 日

特許庁長官  
Commissioner,  
Japan Patent Office

小 川 洋



出証番号    出証特 2 0 0 4 - 3 0 9 7 9 4 9

【書類名】 特許願  
【整理番号】 PY20040417  
【提出日】 平成16年 3月 5日  
【あて先】 特許庁長官殿  
【国際特許分類】 G02B 5/18  
G01J 3/14  
G02B 6/12

【発明者】  
【住所又は居所】 大阪府大阪市中央区北浜四丁目 7 番 2 8 号 日本板硝子 株式会  
社 内  
【氏名】 橘▲高▼ 重雄

【発明者】  
【住所又は居所】 大阪府大阪市中央区北浜四丁目 7 番 2 8 号 日本板硝子 株式会  
社 内  
【氏名】 大家 和晃

【発明者】  
【住所又は居所】 大阪府大阪市中央区北浜四丁目 7 番 2 8 号 日本板硝子 株式会  
社 内  
【氏名】 常友 啓司

【特許出願人】  
【識別番号】 000004008  
【氏名又は名称】 日本板硝子 株式会社

【代理人】  
【識別番号】 100068755  
【弁理士】  
【氏名又は名称】 恩田 博宣

【選任した代理人】  
【識別番号】 100105957  
【弁理士】  
【氏名又は名称】 恩田 誠

【先の出願に基づく優先権主張】  
【出願番号】 特願2003-199538  
【出願日】 平成15年 7月18日

【手数料の表示】  
【予納台帳番号】 002956  
【納付金額】 21,000円

【提出物件の目録】  
【物件名】 特許請求の範囲 1  
【物件名】 明細書 1  
【物件名】 図面 1  
【物件名】 要約書 1  
【包括委任状番号】 9908293

## 【書類名】 特許請求の範囲

## 【請求項 1】

一方向に周期性を有するフォトニック結晶により構成され、前記一方向に垂直な方向に電磁波が伝播するコアを備えたフォトニック結晶導波路であって、

前記電磁波は、前記コアのフォトニックバンド構造における、プリルアンゾーンの境界線上にあるフォトニックバンドの伝播モードによって伝播し、

前記コアの、前記一方向と平行な側面は屈折率  $n_s$  の均質媒体クラッドと接し、前記電磁波の真空中での波長を  $\lambda_0$ 、前記フォトニック結晶の周期を  $a$ 、前記コア内を伝播する波長の、前記一方向に垂直な方向の周期を  $\lambda$  とすると、

$$\lambda_0 / n_s > a \lambda / (\lambda^2 / 4 + a^2) \quad 0.5$$

の条件を満たすことを特徴とするフォトニック結晶導波路。

## 【請求項 2】

請求項 1 に記載のフォトニック結晶導波路において、

前記コアの、前記一方向に垂直な表面には、均質物質或いは少なくとも前記一方向に周期性を有するフォトニック結晶により構成され、前記コア内を伝播する電磁波が前記表面から外部に漏れるのを阻止する閉じ込め用クラッドが設けられていることを特徴とするフォトニック結晶導波路。

## 【請求項 3】

請求項 1 又は 2 に記載のフォトニック結晶導波路において、

$$\lambda_0 / n_s - a (\lambda / \cos \phi) / \{ (\lambda / 2 \cos \phi)^2 + a^2 \} \quad 0.5 = 0$$

を満たす前記電磁波の伝播角  $\phi$  が  $0 < \phi < 90^\circ$  の範囲にあり、その値を前記電磁波が前記側面で閉じ込めがなされる伝播角の最大値  $\phi_0$  とし、

前記コア内を伝播する波動が前記伝播角の最大値  $\phi_0$  をもって前記側面で反射する場合の位相変化量が  $s\pi$  であり、 $0 \leq s \leq 1$  の範囲にあるとき、

前記コアの導波路長さ方向と垂直な方向における横幅  $2L$  は、

$$s \lambda / 2 \cos \phi_0 \leq 2L < (s+1) \lambda / 2 \cos \phi_0$$

の範囲にあることを特徴とするフォトニック結晶導波路。

## 【請求項 4】

請求項 1 又は 2 に記載のフォトニック結晶導波路において、

前記コア内を前記一方向に垂直な方向に伝播する波動が前記側面に垂直入射して反射する場合の位相変化量が  $s\pi$  であり、 $0 \leq s \leq 1$  の範囲にあるとすると、

$$\lambda_0 / n_s - 2a > 0 \text{ と}$$

$$s \lambda / 2 \leq 2L$$

を満たすことを特徴とするフォトニック結晶導波路。

## 【請求項 5】

請求項 4 に記載のフォトニック結晶導波路において、

前記コアの導波路長さ方向に垂直な方向における横幅  $2L$  は、

$$s \lambda / 2 \leq 2L < (s+1) \lambda / 2$$

の範囲にあることを特徴とするフォトニック結晶導波路。

## 【請求項 6】

請求項 1 ～ 5 のいずれか一つに記載のフォトニック結晶導波路において、

前記コアの表面には、前記閉じ込め用クラッドとして、少なくとも前記一方向に周期性を有し前記コアと同一の材料によるフォトニック結晶のクラッド層が設けられており、前記一方向におけるクラッド層によるフォトニックバンドギャップは、前記コアの前記一方向における伝播モードを閉じ込め、かつ前記伝播モードに近接するモードを放射モードとすることを特徴とするフォトニック結晶導波路。

## 【請求項 7】

請求項 1 ～ 6 のいずれか一つに記載のフォトニック結晶導波路において、

前記コアの周期構造が露出する端面に位相変調手段を備え、前記位相変調手段により、

前記コア内を伝播する波動と外部平面波を結合させることを特徴とするフォトニック結晶導波路。

【請求項 8】

請求項 7 に記載のフォトニック結晶導波路において、

前記位相変調手段は、

$n$  は外部媒体の屈折率、 $\lambda_0$  は外部平面波の真空中における波長とすると、前記コアの前記一方向と平行な端面を外部との結合面とし、前記結合面では以下の数式

$$n \cdot \sin \theta \cdot (a / \lambda_0) = 0.5$$

で表わす前記一方向における入射角  $\theta$  を有する平面波を前記端面と結合させることを特徴とするフォトニック結晶導波路。

【請求項 9】

請求項 7 に記載のフォトニック結晶導波路において、

前記位相変調手段は、

$n$  は外部媒体の屈折率、 $\lambda_0$  は外部平面波の真空中における波長とすると、前記コアの前記一方向と平行な端面を外部との結合面とし、前記結合面では以下の数式

$$n \cdot \sin \theta \cdot (a / \lambda_0) = 0.5$$

で表わす前記一方向における入射角  $\pm \theta$  を有する同位相の 2 つの平面波を干渉させて前記端面と結合させることを特徴とするフォトニック結晶導波路。

【請求項 10】

請求項 7 に記載のフォトニック結晶導波路において、

前記位相変調手段は、

前記コアの前記一方向と平行な端面である入射面に近接もしくは接触もしくは一体化して配置され、前記コアを構成する前記フォトニック結晶と同一方向に 2 倍の周期を有する位相格子であり、

前記位相格子により、前記外部平面波と前記コア内を伝播する波動を結合させることを特徴とするフォトニック結晶導波路。

【請求項 11】

請求項 7 に記載のフォトニック結晶導波路において、

前記位相変調手段は、

前記コアの前記一方向と平行な端面に近接もしくは接触もしくは一体化して配置され、前記コアを構成する前記フォトニック結晶と同一方向に同一の周期を有する位相格子であり、

$n$  は外部媒体の屈折率、 $\lambda_0$  は外部平面波の真空中における波長とすると、

前記位相格子により前記コア内を伝播する波動（伝播光）と結合される前記外部平面波の入射角或いは出射角  $\theta$  は、以下の数式

$$n \cdot \sin \theta \cdot (a / \lambda_0) = 0.5$$

を満足することを特徴とするフォトニック結晶導波路。

【請求項 12】

請求項 7 に記載のフォトニック結晶導波路において、

前記位相変調手段は、

前記コアの前記一方向と平行な端面に近接もしくは接触もしくは一体化して配置され、前記コアを構成する前記フォトニック結晶と同一方向に 2 倍の周期を有する位相格子であり、

$n$  は外部媒体の屈折率、 $\lambda_0$  は外部平面波の真空中における波長とすると、

前記位相格子により前記コア内を伝播する波動（伝播光）と結合される前記外部平面波の入射角或いは出射角  $\theta$  は、以下の数式

$$n \cdot \sin \theta \cdot (a / \lambda_0) = 0.5$$

を満足することを特徴とするフォトニック結晶導波路。



**【請求項 13】**

請求項 7 に記載のフォトニック結晶導波路において、

前記位相変調手段は、

前記コアの前記一方向に対して傾いた斜め端面に、前記外部平面波を直接結合させることを特徴とするフォトニック結晶導波路。

**【請求項 14】**

請求項 13 に記載のフォトニック結晶導波路において、

前記コアの前記斜め端面に接触あるいは近接したプリズムもしくは鏡面を設置して、前記外部平面波の入射方向もしくは出射方向を変化させることを特徴とするフォトニック結晶導波路。

**【請求項 15】**

請求項 14 に記載のフォトニック結晶導波路において、

前記外部平面波の入射方向もしくは出射方向を前記フォトニック結晶により構成される前記コア内での伝播方向と一致させることを特徴とするフォトニック結晶導波路。

**【請求項 16】**

請求項 14 に記載のフォトニック結晶導波路において、

前記外部平面波の入射方向もしくは出射方向を前記フォトニック結晶により構成される前記コア内での伝播方向と垂直にすることを特徴とするフォトニック結晶導波路。

**【請求項 17】**

請求項 14 に記載のフォトニック結晶導波路において、

前記プリズムの屈折率を 3 以上とすることを特徴とするフォトニック結晶導波路。

**【請求項 18】**

請求項 14 に記載のフォトニック結晶導波路において、

前記コアの前記一方向に対して傾いた斜め端面と、前記斜め端面に近接もしくは接触もしくは一体化した回折格子により構成されることを特徴とするフォトニック結晶導波路。

**【請求項 19】**

請求項 18 に記載のフォトニック結晶導波路において、

前記回折格子を介して前記コア内を伝播する波動と結合される前記外部平面波の入射方向もしくは出射方向を、前記フォトニック結晶により構成される前記コア内での伝播方向と一致させることを特徴とするフォトニック結晶導波路。

**【請求項 20】**

請求項 1 ～ 19 のいずれか一つに記載のフォトニック結晶導波路において、

前記コアの導波路長さ方向と垂直な方向における横幅をテーパ状に変化させたことを特徴とするフォトニック結晶導波路。

**【請求項 21】**

一方向に周期性を有するフォトニック結晶により構成され、前記一方向に垂直な方向に電磁波が伝播するコアを備えたフォトニック結晶導波路であって、

前記電磁波は、前記コアのフォトニックバンド構造における、ブリルアンゾーンの中心線上にある高次フォトニックバンドの伝播モードによって伝播し、

前記コアの、前記一方向と平行な側面は屈折率  $n_s$  の均質媒体クラッドと接し、前記電磁波の真空中での波長を  $\lambda_0$ 、前記フォトニック結晶の周期を  $a$ 、前記コア内を伝播する波動の、前記一方向に垂直な方向の周期を  $\lambda$  とすると、

$$\lambda_0 / n_s - \lambda > 0$$

の条件を満たすことを特徴とするフォトニック結晶導波路。

**【請求項 22】**

請求項 21 に記載のフォトニック結晶導波路において、

前記コアの、前記一方向に垂直な表面には、均質物質或いは少なくとも前記一方向に周期性を有するフォトニック結晶により構成され、前記コア内を伝播する電磁波が前記表面から外部に漏れるのを阻止する閉じ込め用クラッドが設けられていることを特徴とするフォトニック結晶導波路。

## 【請求項 23】

請求項 21 又は 22 に記載のフォトニック結晶導波路において、

$$\lambda_0 / n_s - \lambda / \cos \phi = 0$$

を満たす前記電磁波の伝播角  $\phi$  が  $0 < \phi < 90^\circ$  の範囲にあり、その値を前記電磁波が前記側面で閉じ込めがなされる伝播角の最大値  $\phi_0$  とし、

前記コア内を伝播する波動が前記伝播角の最大値  $\phi_0$  をもって前記側面で反射する場合の位相変化量が  $s\pi$  であり、 $0 \leq s \leq 1$  の範囲にあるとすると、

前記コアの導波路長さ方向と垂直な方向における横幅  $2L$  は、

$$s\lambda / 2 \cos \phi_0 \leq 2L < (s+1)\lambda / 2 \cos \phi_0$$

の範囲にあることを特徴とするフォトニック結晶導波路。

## 【請求項 24】

請求項 21～23 のいずれか一つに記載のフォトニック結晶導波路において、

前記コアの表面には、前記閉じ込め用クラッドとして、少なくとも前記一方向に周期性を有し前記コアと同一の材料によるフォトニック結晶のクラッド層が設けられており、前記クラッド層によるフォトニックバンドギャップは、前記コアの前記一方向における伝播モードを閉じ込め、かつ前記伝播モードに近接するモードを放射モードとすることを特徴とするフォトニック結晶導波路。

## 【請求項 25】

請求項 21～24 のいずれか一つに記載のフォトニック結晶導波路において、

前記コアの周期構造が露出する端面に位相変調手段を備え、前記位相変調手段により、前記コア内を伝播する波動と外部平面波を結合させることを特徴とするフォトニック結晶導波路。

## 【請求項 26】

請求項 25 に記載のフォトニック結晶導波路において、

前記位相変調手段は、

$n$  は外部媒体の屈折率、 $\lambda_0$  は外部平面波の真空中における波長とすると、

前記コアの前記一方向と平行な端面を外部との結合面とし、前記結合面では以下の数式

$$n \cdot \sin \theta \cdot (a / \lambda_0) = 1.0$$

で表わす前記一方向における入射角  $\theta$  を有する同位相の 2 つの平面波を干渉させて前記端面と結合させることを特徴とするフォトニック結晶導波路。

## 【請求項 27】

請求項 25 に記載のフォトニック結晶導波路において、

前記位相変調手段は、

$n$  は外部媒体の屈折率、 $\lambda_0$  は外部平面波の真空中における波長とすると、

前記コアの前記一方向と平行な端面を外部との結合面とし、前記結合面では以下の数式

$$n \cdot \sin \theta \cdot (a / \lambda_0) = 1.0$$

で表わす前記一方向における入射角  $\theta$  を有する同位相の 2 つの平面波と  $\theta = 0$  の平面波と同時に干渉させて前記端面と結合させることを特徴とするフォトニック結晶導波路。

## 【請求項 28】

請求項 25 に記載のフォトニック結晶導波路において、

前記コアの前記一方向と平行な端面である入射面に近接もしくは接触もしくは一体化して配置され、前記コアを構成する前記フォトニック結晶と同一方向に同じ周期を有する位相格子であり、

前記位相格子により、前記外部平面波と前記コア内を伝播する波動を結合させることを特徴とするフォトニック結晶導波路。

## 【請求項 29】

請求項 21～28 のいずれか一つに記載のフォトニック結晶導波路において、

前記コアの導波路長さ方向と垂直な方向における横幅をテーパ状に変化させたことを特

徴とするフォトニック結晶導波路。

【請求項 30】

一方向に有限な厚さを有する屈折率  $n_0$  の均質媒体により構成され、前記一方向に垂直な方向に電磁波が伝播するコアを備えた均質媒体導波路であって、

前記電磁波は、前記コアの一方向における 1 次以上の伝播モードによって伝播し、

前記コアの、前記一方向と平行な側面は屈折率  $n_s$  の均質媒体クラッドと接し、

$$n_s < n_0$$

の条件を満たすことを特徴とする均質媒体導波路。

【請求項 31】

請求項 30 に記載の均質媒体導波路において、

前記コアの、前記一方向に垂直な表面には、均質物質或いは少なくとも前記一方向に周期性を有するフォトニック結晶により構成され、前記コア内を伝播する電磁波が前記表面から外部に漏れるのを阻止する閉じ込め用クラッドが設けられていることを特徴とする均質媒体導波路。

【請求項 32】

請求項 30 又は 31 に記載の均質媒体導波路において、

$$n_s - n_0 \{ \sin^2 \phi + \cos^2 \phi \cos^2 \phi \} 0.5 = 0$$

を満たす前記電磁波の前記一方向に垂直な方向における伝播角  $\phi$  が  $0 < \phi < 90^\circ$  の範囲にあり、その値を前記電磁波が前記側面で閉じ込めがなされる伝播角の最大値  $\phi_0$  とし、

前記コア内を伝播する前記電磁波の真空中での波長を  $\lambda_0$ 、前記一方向での伝播モードの伝播角を  $\psi$  とし、前記コアの一方向に垂直な方向に伝播する波動が前記伝播角の最大値  $\phi_0$  をもって前記側面で反射する場合の位相変化量が  $s\pi$  であり、 $0 \leq s \leq 1$  の範囲にあるとすると、

前記コアの導波路長さ方向における横幅  $2L$  は、

$$s \lambda_0 \cos \psi / 2 \sin \phi_0 \leq 2L < (s+1) \lambda_0 \cos \psi / 2 \sin \phi_0$$

の範囲にあることを特徴とする均質媒体導波路。

【請求項 33】

請求項 30 又は 31 に記載の均質媒体導波路において、

前記コア内を伝播する波動が前記側面に、前記一方向に垂直な方向（XZ 平面方向）において垂直入射して反射する場合の位相変化量が  $s\pi$  であり、 $0 \leq s \leq 1$  の範囲にあるとすると、

$$n_s - n_0 \sin \psi < 0 \text{ と}$$

$$s \lambda_0 \cos \psi / 2 \leq 2L$$

を満たすことを特徴とする均質媒体導波路。

【請求項 34】

請求項 33 に記載の均質媒体導波路において、

前記コアの前記横幅  $2L$  は、

$$s \lambda_0 \cos \psi / 2 \leq 2L < (s+1) \lambda_0 \cos \psi / 2$$

の範囲にあることを特徴とする均質媒体導波路。

【請求項 35】

請求項 30 ～ 34 のいずれか一つに記載の均質媒体導波路において、

以下の数式において  $n_0$  は前記コアの屈折率、 $n_m$  は入射光側の屈折率、 $\psi$  は前記コア内を伝播する高次モード光の伝播角とすると、

前記コアの前記一方向と平行な端面に、

$$\sin \theta = (n_0 / n_m) \sin \psi$$

の数式で表わす前記一方向における入射角  $\theta$  の外部平面波を結合させて、前記外部平面波を入射光もしくは出射光となすことを特徴とする均質媒体導波路。

【請求項 36】

請求項 30 ～ 34 のいずれか一つに記載の均質媒体導波路において、

前記コアの前記一方向に対して傾いた斜め端面に、前記コア内を伝播する前記一方向に

における高次モード光の伝播角 $\psi$ に結合する入射角を有する外部平面波を結合させて、前記外部平面波を入射光もしくは出射光となすことを特徴とする均質媒体導波路。

【請求項 37】

請求項 30～34 のいずれか一つに記載の均質媒体導波路において、

前記コアの前記一方向に対して傾いた斜め端面に接触あるいは近接したプリズムもしくは鏡面を設置して、前記コア内を伝播する前記一方向における高次モード光と外部平面波を結合させて、前記外部平面波を入射光もしくは出射光となすことを特徴とする均質媒体導波路。

【請求項 38】

請求項 37 に記載の均質媒体導波路において、

前記外部平面波の入射方向もしくは出射方向を導波路内での伝播方向と一致させることを特徴とする均質媒体導波路。

【請求項 39】

請求項 37 に記載の均質媒体導波路において、

前記外部平面波の入射方向もしくは出射方向を導波路内での伝播方向と垂直にすることを特徴とする均質媒体導波路。

【請求項 40】

請求項 37 に記載の均質媒体導波路において、

前記プリズムの屈折率を 3 以上とすることを特徴とする均質媒体導波路。

【請求項 41】

請求項 30～34 のいずれか一つに記載の均質媒体導波路において、

前記コアの前記一方向に対して傾いた斜め端面に、近接もしくは接触もしくは一体化した回折格子を設置することを特徴とする均質媒体導波路。

【請求項 42】

請求項 41 に記載の均質媒体導波路において、

外部平面波の入射方向もしくは出射方向を導波路内での伝播方向と一致させることを特徴とする均質媒体導波路。

【請求項 43】

請求項 30～34 のいずれか一つに記載の均質媒体導波路において、

前記コアの前記一方向と平行な端面に、近接あるいは接触あるいは一体化した位相格子を備え、外部の平面波と前記位相格子による回折光を前記コア内を伝播する前記一方向における高次モード光と結合させて、前記平面波を入射光もしくは出射光となすことを特徴とする均質媒体導波路。

【請求項 44】

請求項 30～43 のいずれか一つに記載の均質媒体導波路において、

前記コアの導波路長さ方向と垂直な方向における横幅をテーパ状に変化させたことを特徴とする均質媒体導波路。

【請求項 45】

請求項 1～44 のいずれか一つに記載のフォトニック結晶導波路或いは均質媒体導波路を用いた光学素子であって、

所定の結合長の結合領域で近接するように屈曲して形成された 2 つの導波路を有する方向性結合器として構成され、

前記 2 つの導波路を前記フォトニック結晶導波路或いは前記均質媒体導波路のいずれかで構成したことを特徴とする光学素子。

【請求項 46】

請求項 1～44 のいずれか一つに記載のフォトニック結晶導波路或いは均質媒体導波路を用いた光学素子であって、

一つの直線状の導波路と、この導波路から分岐した 2 つの導波路と、これら 2 つの導波路が合流した一つの直線状の導波路とを有するマッハツェンダー型光スイッチとして構成され、

前記各導波路を、前記フォトニック結晶導波路或いは前記均質媒体導波路のいずれかで構成したことを特徴とする光学素子。

【請求項 47】

請求項 1～44 のいずれか一つに記載のフォトニック結晶導波路或いは均質媒体導波路を用いた光学素子であって、

直線状の導波路と遅延部分を含む一つの導波路を有する光遅延線として構成され、

前記導波路と遅延部分を前記フォトニック結晶導波路或いは前記均質媒体導波路のいずれかで構成されていることを特徴とする光学素子。

【請求項 48】

請求項 1～44 のいずれか一つに記載のフォトニック結晶導波路或いは均質媒体導波路を用いた光学素子であって、

前記フォトニック結晶導波路或いは前記均質媒体導波路のいずれかで構成した導波路を備えた分散制御素子として構成され、

前記導波路を伝播する伝播光として分散の大きい条件の伝播光を用いることを特徴とする光学素子。

【請求項 49】

請求項 1～44 のいずれか一つに記載のフォトニック結晶導波路或いは均質媒体導波路を用いた光学素子であって、

前記フォトニック結晶導波路或いは前記均質媒体導波路のいずれかで構成した導波路を備え、前記導波路のコアに非線形特性を有する物質を含ませてあり、

前記導波路の前記一方向における両側表面に 2 つの電極を設けた電極付導波路素子として構成したことを特徴とする光学素子。

【請求項 50】

請求項 1～43 のいずれか一つに記載のフォトニック結晶導波路或いは均質媒体導波路を用いた光学素子であって、

前記フォトニック結晶導波路或いは前記均質媒体導波路のいずれかで構成した導波路を備え、前記導波路のコアに非線形特性を有する物質を含ませてあり、

前記導波路の前記一方向における両側表面に 2 つの電極を設けた電極付導波路素子として構成し、

前記 2 つの電極に印加する電圧や電流を変化させる変調器を備えることを特徴とする光学素子。

【請求項 51】

請求項 1～43 のいずれか一つに記載のフォトニック結晶導波路或いは均質媒体導波路を用いた光学素子であって、

前記クラッドの閉じ込めを不完全とすることによって発生する前記コアからの屈折光を利用することを特徴とする光学素子。

## 【書類名】明細書

【発明の名称】フォトリック結晶導波路、均質媒体導波路、および光学素子

## 【技術分野】

## 【0001】

本発明は、周期性のない方向に電磁波を伝播させる、導波路形状の1次元フォトリック結晶を用いたフォトリック結晶導波路、均質媒体のコアを備えた均質媒体導波路、および方向性結合器や光スイッチなどの光学素子に関する。

## 【背景技術】

## 【0002】

基板上に導波路を配置した光素子は既に実用化しているが、最近になって2次元フォトリック結晶(2D-PhC)を用いた欠陥導波路が注目され、研究開発が盛んに行なわれている。即ち、高屈折率の薄膜層(Siなど)に規則的な空孔を配置して2次元フォトリック結晶となし、使用周波数域において平面方向(XZ方向)の完全フォトリックバンドギャップを形成する。この2D-PhCに線状の欠陥を設けると、欠陥部分に入った光はフォトリック結晶部分に出て行くことができず閉じ込められるので、導波路となる(特許文献1参照)。

## 【0003】

2D-PhCを用いた導波路には、次のような特徴がある。

- ・導波路の急激曲げ(60°、90°など)が可能なので、個別の光素子そのもの、あるいは光素子間を繋ぐ配線を、非常にコンパクトなものとすることができる。

## 【0004】

- ・導波路中を伝播する電磁波に「群速度異常」を起こすことができ、非線形作用を大きくして素子の特性を改善したり、サイズを小さくすることができる。

このような2次元或いは3次元フォトリック結晶による導波路或いはフォトリック結晶によらない通常の導波路を用いた光学素子として、次のようなものがある。

## 【0005】

- ・光合分波器としての方向性結合器(特許文献2参照)。
- ・外部からの電流注入や光の照射によりオン/オフ操作を行う光スイッチ(特許文献3参照)。

## 【0006】

- ・対称マッハツェンダー型全光スイッチ(非特許文献1参照)。
- ・光遅延線(非特許文献2参照)。
- ・点欠陥共振器(特許文献4、5参照)。

## 【0007】

また、高次フォトリックバンド、あるいは高次モードによる伝播光は、周波数変化に対して実効屈折率が大きく変化するため、コアとなる多層膜の周期方向閉じ込めを意図的に弱くしておく、表面から波長による角度差の極めて大きい屈折光が放出され、分光素子としての機能を持たせることができる。本発明者らは、この屈折光を利用した分光素子を提案してきており、「ブリルアンゾーン中央の高次バンド伝播光」を用いた形態のものが知られている(例えば、特許文献6～11参照)。

【特許文献1】特開2001-281480

【特許文献2】特開2001-174652

【特許文献3】特開2002-303836

【特許文献4】特開2001-272555

【特許文献5】特開2003-161971

【非特許文献1】「オプトロニクス」2002年4月号、132頁

【非特許文献2】「フォトリック結晶技術とその応用」244頁(シーエムシー出版、2002年)

【特許文献6】特開2002-236206

【特許文献7】特開2002-169022

【特許文献8】特開 2002-182026

【特許文献9】特開 2002-267845

【特許文献10】特開 2003-240934

【特許文献11】特開 2003-287633

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0008】

しかしながら、上記従来の導波路には次のような問題点があった。

導波路を構成するフォトニック結晶の構造が正方形配列の場合、急激曲げの角度はほとんど  $90^\circ$  に限られる。同様に、三角配列の場合は  $60^\circ$  か  $120^\circ$  である。従って導波路や、導波路を用いて構成した上述したような各種の光学阻止を自由な角度で配置することができず、設計上の制約となる。

【0009】

本発明は、このような従来の問題点に着目してなされたもので、その目的は、急激曲げや自由な角度での配置が可能で、かつ低伝播損失のフォトニック結晶導波路、均質媒体導波路、およびこれらを用いた光学素子を提供することにある。

【課題を解決するための手段】

【0010】

上記課題を解決するため、請求項1に係る発明は、一方向に周期性を有するフォトニック結晶により構成され、前記一方向に垂直な方向に電磁波が伝播するコアを備えたフォトニック結晶導波路であって、前記電磁波は、前記コアのフォトニックバンド構造における、ブリルアンゾーンの境界線上にあるフォトニックバンドの伝播モードによって伝播し、前記コアの、前記一方向と平行な側面は屈折率  $n_s$  の均質媒体クラッドと接し、前記電磁波の真空中での波長を  $\lambda_0$ 、前記フォトニック結晶の周期を  $a$ 、前記コア内を伝播する波動の、前記一方向に垂直な方向の周期を  $\lambda$  とすると、

$$\lambda_0 / n_s > a \lambda / (\lambda^2 / 4 + a^2) 0.5$$

の条件を満たすことを要旨とする。

【0011】

フォトニック結晶の高次バンドによる伝播光（高次バンド伝播光）を利用する光学素子は非常に有用である。フォトニック結晶内を前記一方向と垂直な方向に進む高次バンド伝播光は、ブリルアンゾーンの境界線上にあるフォトニックバンドを利用して得ることができる。

【0012】

ブリルアンゾーンの境界線上では、全てのバンドが高次バンドと同様な変化をなす。したがって、全てのバンドにおいて「実効屈折率の波長による大きな変化」や「群速度異常」が起こるので、これらの特性を利用して光遅延素子や分散制御素子などの光学素子を、入射光エネルギーの利用効率や S/N 比を低下させずに作ることができる。

【0013】

フォトニック結晶導波路の側面（前記一方向に垂直な平面と平行）には、市松模様の電場パターンが露出している。その側面は屈折率  $n_s$  の均質媒体と接しているとする、その側面には、複数種類の周期に対応する波面が均質媒体側に生じて、漏れ光となる可能性がある。漏れ光が生じないようにするための最低限必要な条件は、

$$\lambda_0 / n_s > a \lambda / (\lambda^2 / 4 + a^2) 0.5$$

である。

【0014】

請求項1に係る発明によれば、上記条件を満たすことで、ブリルアンゾーンの境界線上のフォトニックバンドによりコア内を前記一方向と垂直な方向に伝播する波動を、伝播角  $\phi$  が  $\phi = 0^\circ$  の場合にコアの前記側面で閉じ込めることができる。

【0015】

ここで、「一方向に垂直な方向」とは、一方向に垂直な平面と平行なあらゆる方向をい

う。例えば、一方向を Y 方向とすると、「一方向に垂直な方向」とは、Y 方向に垂直な XZ 平面と平行なあらゆる方向 (XZ 平面方向) をいう。

#### 【0016】

請求項 2 に係る発明は、請求項 1 に記載のフォトニック結晶導波路において、前記コアの、前記一方向に垂直な表面には、均質物質或いは少なくとも前記一方向に周期性を有するフォトニック結晶により構成され、前記コア内を伝播する電磁波が前記表面から外部に漏れるのを阻止する閉じ込め用クラッドが設けられていることを要旨とする。

#### 【0017】

この構成によれば、閉じ込め用クラッドにより、コア内を伝播する電磁波がコアの一方向に垂直な表面から外部に漏れるのを阻止できる。

請求項 3 に係る発明は、請求項 1 又は 2 に記載のフォトニック結晶導波路において、

$$\lambda_0 / n_s - a (\lambda / \cos \phi) / \{ (\lambda / 2 \cos \phi)^2 + a^2 \} 0.5 = 0$$

を満たす前記電磁波の伝播角  $\phi$  が  $0 < \phi < 90^\circ$  の範囲にあり、その値を前記電磁波が前記側面で閉じ込めがなされる伝播角の最大値  $\phi_0$  とし、前記コア内を伝播する波動が前記伝播角の最大値  $\phi_0$  をもって前記側面で反射する場合の位相変化量が  $s\pi$  であり、 $0 \leq s \leq 1$  の範囲にあるとき、前記コアの導波路長さ方向と垂直な方向における横幅  $2L$  は、 $s\lambda / 2 \cos \phi_0 \leq 2L < (s+1)\lambda / 2 \cos \phi_0$  の範囲にあることを要旨とする。

#### 【0018】

ここにいう「電磁波の伝播角  $\phi$ 」は、コア内を伝播する電磁波の、前記一方向に垂直な方向 (例えば、XZ 平面方向) における進行方向と、コアの導波路長さ方向とがなす角度をいう。

#### 【0019】

一般にフォトニック結晶のコア内を伝播光が前記一方向に垂直な方向に対して伝播角  $\phi$  だけ傾いて進行する場合、コアの前記側面には、複数種類の周期に対応する波面が均質媒体側に生じて、漏れ光となる可能性がある。ただし、漏れ光が生じるのは周期  $a (\lambda / \cos \phi) / \{ (\lambda / 2 \cos \phi)^2 + a^2 \} 0.5$  に対応する波面が

$$\lambda_0 / n_s < a (\lambda / \cos \phi) / \{ (\lambda / 2 \cos \phi)^2 + a^2 \} 0.5$$

の条件を満たす場合に限られる。

#### 【0020】

請求項 3 に係る発明によれば、前記の条件を満たすことで、フォトニック結晶導波路を「不完全閉じ込め単一モード導波路」に構成できる。この導波路では、伝播角  $\phi$  によっては漏れ光の発生する条件であるが、導波路幅  $2L$  を充分小さくとしているので単一モード条件となる。

#### 【0021】

- ・伝播角  $\phi$  が伝播角の最大値  $\phi_0$  ( $0 < \phi_0 < 90^\circ$ ) を超えると漏れ光が生じるので、伝播角  $\phi$  がその最大値  $\phi_0$  を超えない範囲で急激曲げが可能になる。
- ・分散や群速度異常といった特性が小さいことが望ましい、単純な導波路に適している。

#### 【0022】

請求項 4 に係る発明は、請求項 1 又は 2 に記載のフォトニック結晶導波路において、前記コア内を前記一方向に垂直な方向に伝播する波動が前記側面に垂直入射して反射する場合の位相変化量が  $s\pi$  であり、 $0 \leq s \leq 1$  の範囲にあるとすると、

$$\lambda_0 / n_s - 2a > 0 \text{ と}$$

$$s\lambda / 2 \leq 2L$$

を満たすことを要旨とする。

#### 【0023】

この構成によれば、前記の条件を満たすことで、フォトニック結晶導波路を「完全閉じ込め多モード導波路」とすることができ、次のような作用効果が得られる。

- ・伝播角  $\phi$  によらず伝播する波動がコア内に閉じ込められるので、共振器などに適する



## 【0024】

・導波路幅は一定である必要も無く、上限も無いので、自由な形状の共振器とすることができる。

・群速度が遅い（分散が大きい）領域であれば、非線形作用が増強されるので、非線形作用を利用する光素子の特性を大きくすることができる。共振器と組み合わせてレーザー発振などを行うこともできる。

## 【0025】

請求項5に係る発明は、請求項4に記載のフォトニック結晶導波路において、前記コアの導波路長さ方向に垂直な方向における横幅  $2L$  は、

$$s\lambda/2 \leq 2L < (s+1)\lambda/2$$

の範囲にあることを要旨とする。

## 【0026】

この構成によれば、前記の必要条件を満たすことで、フォトニック結晶導波路を「完全閉じ込め単一モード導波路」とすることができる。導波路幅  $2L$  は、伝播角  $\phi$  の値にかかわらず、位相整合条件における0次モードのみ存在する範囲にある。このような「完全閉じ込め単一モード導波路」では、次のような作用効果が得られる。

## 【0027】

・単一モード伝播のまま急激曲げが可能で、導波路幅も細いので、素子を極めて小型にまとめることができる。

・完全な閉じ込めとなるのは、 $a/\lambda_0$  が0.5以下という小さい値に対応し、実効屈折率（ $n_{eff}$ ）が比較的小さく、分散や群速度異常の大きい領域となる。従って、分散や群速度異常といった特性が大きいことが望ましい、機能性導波路に適している。群速度が遅い（分散が大きい）領域であれば、非線形作用が増強されるので、非線形作用を利用する光学素子の特性を大きくする、あるいは光路長を短縮することができる。

## 【0028】

請求項6に係る発明は、請求項1～5のいずれか一つに記載のフォトニック結晶導波路において、前記コアの表面には、前記閉じ込め用クラッドとして、少なくとも前記一方向に周期性を有し前記コアと同一の材料によるフォトニック結晶のクラッド層が設けられており、前記一方向におけるクラッド層によるフォトニックバンドギャップは、前記コアの前記一方向における伝播モードを閉じ込め、かつ前記伝播モードに近接するモードを放射モードとすることを要旨とする。

## 【0029】

導波路内の伝播光の前記一方向に垂直な方向（ $XZ$ 平面方向）における実効屈折率が1未満になると、媒体を空気としても前記一方向における電磁波の漏れを防ぐことができなくなる。しかし、この構成によれば、前記一方向に垂直な方向（ $XZ$ 平面方向）における実効屈折率が1未満になる場合でも、コアの表面に設けたフォトニック結晶のフォトニックバンドギャップにより前記一方向における電磁波の閉じ込めを行なうことができる。これにより、伝播損失が小さくかつ低コストのフォトニック結晶導波路を実現できる。

## 【0030】

請求項7に係る発明は、請求項1～6のいずれか一つに記載のフォトニック結晶導波路において、前記コアの周期構造が露出する端面に位相変調手段を備え、前記位相変調手段により、前記コア内を伝播する波動と外部平面波を結合させることを要旨とする。

## 【0031】

この構成によれば、ブリルアンゾーンの境界線上にある特定の高次バンドに属する伝播光のみを得ることができる。また、光路を逆に考えると、高次バンド伝播光を平面波に戻すことができる。

## 【0032】

請求項8に係る発明は、請求項7に記載のフォトニック結晶導波路において、前記位相変調手段は、 $n$  は外部媒体の屈折率、 $\lambda_0$  は外部平面波の真空中における波長とすると、

前記コアの前記一方向と平行な端面を外部との結合面とし、前記結合面では以下の数式

$$n \cdot \sin \theta \cdot (a/\lambda_0) = 0.5$$

で表わす前記一方向における入射角  $\theta$  を有する平面波を前記端面と結合させることを要旨とする。

【0033】

この構成によれば、ブリルアンゾーンの境界線上のフォトニックバンドによりコア内を Z 方向に伝播する波動と平面波とを結合させることができる。

請求項 9 に係る発明は、請求項 7 に記載のフォトニック結晶導波路において、前記位相変調手段は、 $n$  は外部媒体の屈折率、 $\lambda_0$  は外部平面波の真空中における波長とすると、前記コアの前記一方向と平行な端面を外部との結合面とし、前記結合面では以下の数式

$$n \cdot \sin \theta \cdot (a/\lambda_0) = 0.5$$

で表わす前記一方向における入射角  $\pm \theta$  を有する同位相の 2 つの平面波を干渉させて前記端面と結合させることを要旨とする。

【0034】

この構成によれば、2 方向の平面波を交差させて干渉波を作り、そこに前記端面を設置すれば、入射光をブリルアンゾーンの境界線上にある単一のフォトニックバンドによる伝播光と結合させることができる。

【0035】

請求項 10 に係る発明は、請求項 7 に記載のフォトニック結晶導波路において、前記位相変調手段は、前記コアの前記一方向と平行な端面である入射面に近接もしくは接触もしくは一体化して配置され、前記コアを構成する前記フォトニック結晶と同一方向に 2 倍の周期を有する位相格子であり、前記位相格子により、前記外部平面波と前記コア内を伝播する波動を結合させることを要旨とする。

【0036】

この構成によれば、フォトニック結晶と同一方向に 2 倍の周期を有する位相格子に平面波の入射光を垂直入射させると、+1 次回折光と -1 次回折光との干渉により、「平面波による干渉」の場合と同様な腹（電場の山と谷）と節のある電場パターンを作ることができる。ここで、電場の山と谷が、コアを構成する周期多層膜構造であるフォトニック結晶の高屈折率層に存在し、節がその低屈折率層に存在するようにフォトニック結晶を配置すると、第 1 バンドによる伝播光のみが得られる。電場の山と谷がその低屈折率層に存在し、節がその高屈折率層に存在するようにフォトニック結晶を配置すると、第 2 バンドによる伝播光のみが得られる。

【0037】

請求項 11 に係る発明は、請求項 7 に記載のフォトニック結晶導波路において、前記位相変調手段は、前記コアの前記一方向と平行な端面に近接もしくは接触もしくは一体化して配置され、前記コアを構成する前記フォトニック結晶と同一方向に同一の周期を有する位相格子であり、 $n$  は外部媒体の屈折率、 $\lambda_0$  は外部平面波の真空中における波長とすると、前記位相格子により前記コア内を伝播する波動と結合される前記外部平面波の入射角或いは出射角  $\theta$  は、以下の数式

$$n \cdot \sin \theta \cdot (a/\lambda_0) = 0.5$$

を満足することを要旨とする。

【0038】

この構成によれば、特定のバンドによる伝播光を得ることができる。

請求項 12 に係る発明は、請求項 7 に記載のフォトニック結晶導波路において、前記位相変調手段は、前記コアの前記一方向と平行な端面に近接もしくは接触もしくは一体化して配置され、前記コアを構成する前記フォトニック結晶と同一方向に 2 倍の周期を有する位相格子であり、 $n$  は外部媒体の屈折率、 $\lambda_0$  は外部平面波の真空中における波長とすると、前記位相格子により前記コア内を伝播する波動と結合される前記外部平面波の入射角或いは出射角  $\theta$  は、以下の数式

$$n \cdot \sin \theta \cdot (a/\lambda_0) = 0.5$$

を満足することを要旨とする。

【0039】

この構成によれば、 $a/\lambda_0$ の値が小さい場合でも、特定のバンドによる伝播光を得ることができる。

請求項13に係る発明は、請求項7に記載のフォトニック結晶導波路において、前記位相変調手段は、前記コアの前記一方に対して傾いた斜め端面に、前記外部平面波を直接結合させることを要旨とする。

【0040】

この構成によれば、ブリルアンゾーンの境界線上にある特定の高次バンドに属する伝播光のみを得ることができる。また、光路を逆に考えると、高次バンド伝播光を平面波に戻すことができる。

【0041】

請求項14に係る発明は、請求項13に記載のフォトニック結晶導波路において、前記コアの前記斜め端面に接触あるいは近接したプリズムもしくは鏡面を設置して、前記外部平面波の入射方向もしくは出射方向を変化させることを要旨とする。

【0042】

この構成によれば、コアの斜め端面に外部平面波を入射させる場合に、その入射光の向きをプリズムもしくは鏡面によって変えることができる。

請求項15に係る発明は、請求項14に記載のフォトニック結晶導波路において、前記外部平面波の入射方向もしくは出射方向を前記フォトニック結晶により構成される前記コア内での伝播方向と一致させることを要旨とする。

【0043】

この構成によれば、外部平面波の入射方向もしくは出射方向をコア内での伝播方向と一致させるので、他の導波路素子や光ファイバーとの結合が容易になる。

請求項16に係る発明は、請求項14に記載のフォトニック結晶導波路において、前記外部平面波の入射方向もしくは出射方向を前記フォトニック結晶により構成される前記コア内での伝播方向と垂直にすることを要旨とする。

【0044】

この構成によれば、外部平面波をフォトニック結晶が形成される基板の上面と垂直な方向から入射させもしくはその垂直な方向へ出射させることができる。

請求項17に係る発明は、請求項14に記載のフォトニック結晶導波路において、前記プリズムの屈折率を3以上とすることを要旨とする。

【0045】

この構成によれば、外部平面波の周波数が設計周波数から離れても結合バンドの位置の、ブリルアンゾーンの上側の境界線上からのずれを小さくすることができ、境界線での伝播が起こる周波数帯域を広く取ることができる。

【0046】

請求項18に係る発明は、請求項14に記載のフォトニック結晶導波路において、前記コアの前記一方に対して傾いた斜め端面と、前記斜め端面に近接もしくは接触もしくは一体化した回折格子により構成されることを要旨とする。

【0047】

この構成によれば、ブリルアンゾーンの境界線での伝播が起こる周波数帯域を広く取ることができる。回折格子は、特定の次数の回折光が強くなるように、ブレース形状などの設計を行なうことが望ましい。

【0048】

請求項19に係る発明は、請求項18に記載のフォトニック結晶導波路において、前記回折格子を介して前記コア内を伝播する波動と結合される前記外部平面波の入射方向もしくは出射方向を、前記フォトニック結晶により構成される前記コア内での伝播方向と一致させることを要旨とする。

【0049】

この構成によれば、外部平面波の入射方向もしくは出射方向をコア内での伝播方向と一致させるので、他の導波路素子や光ファイバーとの結合が容易になる。

請求項 20 に係る発明は、請求項 1 ～ 19 のいずれか一つに記載のフォトニック結晶導波路において、前記コアの導波路長さ方向と垂直な方向における横幅をテーパ状に変化させたことを要旨とする。

#### 【0050】

この構成によれば、コアの前記横幅（導波路幅  $2L$ ）を、例えばその入射部分の導波路幅を多モード伝播条件となる広さとし、途中でテーパ状に横幅を狭くして単一モード導波路に変換するような「テーパ導波路」にすることができる。このように単一モード条件を満たすコアの前記横幅を、コアの入射面の近くでテーパ状に拡大すると、外部との接続効率を改善することができる。

#### 【0051】

これに対して、上記従来技術（2次元フォトニック結晶を用いた欠陥導波路）では、XZ方向のフォトニックバンドギャップを完全なものとするためには、フォトニック結晶の屈折率差を大きくする必要があり、高屈折率物質（例えば  $n=3.48$  の Si）と空気の組み合わせなどが選ばれる。導波路のコアをなす欠陥部分の屈折率が非常に大きくなるため、単一モード条件を満たすために導波路コアの断面が非常に小さくなる（典型的には  $1 \times 1 \mu\text{m}$  以下）。上記特許文献 1 の方法では、導波路断面を  $2 \times 2 \mu\text{m}$  程度まで大きくしているが、外部の単一モード光ファイバ（コア  $\phi 10 \mu\text{m}$  程度）との差が大きく、効率良く結合させることが難しい。

#### 【0052】

請求項 21 に係る発明は、一方向に周期性を有するフォトニック結晶により構成され、前記一方向に垂直な方向に電磁波が伝播するコアを備えたフォトニック結晶導波路であって、前記電磁波は、前記コアのフォトニックバンド構造における、ブリルアンゾーンの中心線上にある高次フォトニックバンドの伝播モードによって伝播し、前記コアの、前記一方向と平行な側面は屈折率  $n_s$  の均質媒体クラッドと接し、前記電磁波の真空中での波長を  $\lambda_0$ 、前記フォトニック結晶の周期を  $a$ 、前記コア内を伝播する波動の、前記一方向に垂直な方向の周期を  $\lambda$  とすると、

$$\lambda_0 / n_s - \lambda > 0$$

の条件を満たすことを要旨とする。

#### 【0053】

ブリルアンゾーンの中心線上にある特定の高次フォトニックバンドによる伝播光を得るには、例えば、コアを構成する周期  $a$  のフォトニック結晶に対して、同じ方向に周期  $a$  を有する位相変調波を入射させれば良い。

#### 【0054】

請求項 21 に係る発明によれば、上記条件を満たすことで、ブリルアンゾーンの中心線上にある特定の高次フォトニックバンドによりコア内を Z 方向に伝播する波動、つまり伝播角  $\phi$  が  $\phi = 0^\circ$  の波動をコアの前記側面で閉じ込めることができる。すなわち、前記一方向に垂直な方向の閉じ込めを実現するため最低限必要な条件である。ここで、「高次フォトニックバンド」とは、最低次以外のフォトニックバンドを意味する。

#### 【0055】

請求項 22 に係る発明は、請求項 21 に記載のフォトニック結晶導波路において、前記コアの、前記一方向に垂直な表面には、均質物質或いは少なくとも前記一方向に周期性を有するフォトニック結晶により構成され、前記コア内を伝播する電磁波が前記表面から外部に漏れるのを阻止する閉じ込め用クラッドが設けられていることを要旨とする。

#### 【0056】

この構成によれば、閉じ込め用クラッドにより、コア内を伝播する電磁波がコアの一方向に垂直な表面から外部に漏れるのを阻止できる。

請求項 23 に係る発明は、請求項 21 又は 22 に記載のフォトニック結晶導波路において、

$$\lambda_0 / n_s - \lambda / \cos \phi = 0$$

を満たす前記電磁波の伝播角  $\phi$  が  $0 < \phi < 90^\circ$  の範囲にあり、その値を前記電磁波が前記側面で閉じ込めがなされる伝播角の最大値  $\phi_0$  とし、前記コア内を伝播する波動が前記伝播角の最大値  $\phi_0$  をもって前記側面で反射する場合の位相変化量が  $s\pi$  であり、 $0 \leq s \leq 1$  の範囲にあるとすると、前記コアの導波路長さ方向と垂直な方向における横幅  $2L$  は、

$$s\lambda / 2 \cos \phi_0 \leq 2L < (s+1)\lambda / 2 \cos \phi_0$$

の範囲にあることを要旨とする。

#### 【0057】

この構成によれば、前記の条件を満たすことで、フォトニック結晶導波路を「不完全閉じ込め単一モード導波路」とすることができる。すなわち、コア内を伝播する波動の伝播角の最大値が  $\phi_0$  である場合において、コアの横幅  $2L$  を充分小さくすることにより単一モード条件となる。

#### 【0058】

このような「不完全閉じ込め単一モード導波路」では、次のような作用効果が得られる。

- ・伝播角  $\phi$  によっては漏れ光の発生する条件であるが、コアの横幅  $2L$  を充分小さくしているので単一モード条件となる。

#### 【0059】

- ・伝播角  $\phi$  が伝播角の最大値  $\phi_0$  ( $0 < \phi_0 < 90^\circ$ ) を超えると漏れ光が生じるので、急激曲げはできない。導波路構造の設計にあたっては、最小曲げ半径を電磁波シミュレーションなどによって調べておくことが望ましい。

#### 【0060】

- ・ $a/\lambda_0$  を小さくすると、分散や群速度異常の大きい領域となる。従って、機能素子に適している。

請求項 24 に係る発明は、請求項 21～23 のいずれか一つに記載のフォトニック結晶導波路において、前記コアの表面には、前記閉じ込め用クラッドとして、少なくとも前記一方向に周期性を有し前記コアと同一の材料によるフォトニック結晶のクラッド層が設けられており、前記クラッド層によるフォトニックバンドギャップは、前記コアの前記一方向における伝播モードを閉じ込め、かつ前記伝播モードに近接するモードを放射モードとすることを要旨とする。

#### 【0061】

導波路内の伝播光の前記一方向に垂直な方向における実効屈折率が 1 未満になると、媒体を空気としても前記一方向における電磁波の漏れを防ぐことができなくなる。しかし、この構成によれば、前記一方向に垂直な方向における実効屈折率が 1 未満になる場合でも、コアの表面に設けたフォトニック結晶のフォトニックバンドギャップにより前記一方向における電磁波の閉じ込めを行なうことができる。

#### 【0062】

請求項 25 に係る発明は、請求項 21～24 のいずれか一つに記載のフォトニック結晶導波路において、前記コアの周期構造が露出する端面に位相変調手段を備え、前記位相変調手段により、前記コア内を伝播する波動と外部平面波を結合させることを要旨とする。

#### 【0063】

この構成によれば、ブリルアンゾーンの中央線上にある特定の高次フォトニックバンドに属する伝播光のみを得ることができる。また、光路を逆に考えると、高次バンド伝播光を平面波に戻すことができる。

#### 【0064】

請求項 26 に係る発明は、請求項 25 に記載のフォトニック結晶導波路において、前記位相変調手段は、 $n$  は外部媒体の屈折率、 $\lambda_0$  は外部平面波の真空中における波長とすると、前記コアの前記一方向と平行な端面を外部との結合面とし、前記結合面では以下の数式

$$n \cdot \sin \theta \cdot (a/\lambda_0) = 1.0$$

で表わす前記一方向における入射角 $\theta$ を有する同位相の2つの平面波を干渉させて前記端面と結合させることを要旨とする。

#### 【0065】

この構成によれば、2方向の平面波を交差させて干渉波を作り、そこに前記端面を設置すれば、入射光の大部分を高次バンド伝播光にすることができる。

請求項27に係る発明は、請求項25に記載のフォトニック結晶導波路において、前記位相変調手段は、 $n$ は外部媒体の屈折率、 $\lambda_0$ は外部平面波の真空中における波長とすると、前記コアの前記一方向と平行な端面を外部との結合面とし、前記結合面では以下の数式

$$n \cdot \sin \theta \cdot (a/\lambda_0) = 1.0$$

で表わす前記一方向における入射角 $\theta$ を有する同位相の2つの平面波と $\theta=0$ の平面波と同時に干渉させて前記端面と結合させることを要旨とする。

#### 【0066】

この構成によれば、2方向の平面波を交差させて干渉波を作り、そこに前記端面を設置する場合よりも、高次バンド伝播光の割合をさらに増やすことができる。

請求項28に係る発明は、請求項25に記載のフォトニック結晶導波路において、前記コアの前記一方向と平行な端面である入射面に近接もしくは接触もしくは一体化して配置され、前記コアを構成する前記フォトニック結晶と同一方向に同じ周期を有する位相格子であり、前記位相格子により、前記外部平面波と前記コア内を伝播する波動を結合させることを要旨とする。

#### 【0067】

この構成によれば、特定の高次バンド伝播光を得ることができる。

請求項29に係る発明は、請求項21～28のいずれか一つに記載のフォトニック結晶導波路において、前記コアの導波路長さ方向と垂直な方向における横幅をテーパ状に変化させたことを要旨とする。

#### 【0068】

この構成によれば、コアの前記横幅（導波路幅 $2L$ ）を、例えばその入射部分の導波路幅を多モード伝播条件となる広さとし、途中でテーパ状に横幅を狭くして単一モード導波路に変換するような「テーパ導波路」にすることができる。このように単一モード条件を満たすコアの前記横幅を、コアの入射面の近くでテーパ状に拡大すると、外部との接続効率を改善することができる。

#### 【0069】

請求項30に係る発明は、一方向に有限な厚さを有する屈折率 $n_0$ の均質媒体により構成され、前記一方向に垂直な方向に電磁波が伝播するコアを備えた均質媒体導波路であって、前記電磁波は、前記コアの一方向における1次以上の伝播モードによって伝播し、前記コアの、前記一方向と平行な側面は屈折率 $n_s$ の均質媒体クラッドと接し、

$$n_s < n_0$$

の条件を満たすことを要旨とする。

#### 【0070】

この構成によれば、コア内を前記一方向に垂直な方向に伝播する波動、つまり伝播角 $\phi$ が $\phi=0^\circ$ の波動をコアの前記側面で閉じ込めることができる。すなわち、前記一方向に垂直な方向の閉じ込めを行うための最低条件である。

#### 【0071】

請求項31に係る発明は、請求項30に記載の均質媒体導波路において、前記コアの、前記一方向に垂直な表面には、均質物質或いは少なくとも前記一方向に周期性を有するフォトニック結晶により構成され、前記コア内を伝播する電磁波が前記表面から外部に漏れるのを阻止する閉じ込め用クラッドが設けられていることを要旨とする。

#### 【0072】

高次モード伝播光の前記一方向に垂直な方向における実効屈折率が1未満になると、媒

体を空気としても前記一方向における電磁波の漏れを防ぐことができなくなる。しかし、この構成によれば、前記一方向に垂直な方向における実効屈折率が1未満になる場合でも、コアの表面に設けたフォトニック結晶のフォトニックバンドギャップにより前記一方向における電磁波の閉じ込めを行なうことができる。これにより、伝播損失が小さくかつ低コストのフォトニック結晶導波路を実現できる。

#### 【0073】

請求項32に係る発明は、請求項30又は31に記載の均質媒体導波路において、

$$n_s - n_0 \{ \sin^2 \phi + \cos^2 \phi \cos^2 \phi_0 \} > 0.5 = 0$$

を満たす前記電磁波の前記一方向に垂直な方向における伝播角  $\phi$  が  $0 < \phi < 90^\circ$  の範囲にあり、その値を前記電磁波が前記側面で閉じ込めがなされる伝播角の最大値  $\phi_0$  とし、前記コア内を伝播する前記電磁波の真空中での波長を  $\lambda_0$ 、前記一方向での伝播モードの伝播角を  $\psi$  とし、前記コアの一方向に垂直な方向に伝播する波動が前記伝播角の最大値  $\phi_0$  をもって前記側面で反射する場合の位相変化量が  $s\pi$  であり、 $0 \leq s \leq 1$  の範囲にあるとすると、前記コアの導波路長さ方向における横幅  $2L$  は、

$$s \lambda_0 \cos \psi / 2 \sin \phi_0 \leq 2L < (s+1) \lambda_0 \cos \psi / 2 \sin \phi_0$$

の範囲にあることを要旨とする。

#### 【0074】

この構成によれば、前記の必要条件を満たすことで、均質媒体導波路を「不完全閉じ込め単一モード導波路」とすることができる。このような「不完全閉じ込め単一モード導波路」では、次のような作用効果が得られる。

#### 【0075】

・伝播角  $\phi$  によっては漏れ光の発生する条件であるが、横幅  $2L$  を充分小さくとっているので単一モード条件となる。

・伝播角  $\phi$  が  $\phi_0$  ( $0 < \phi_0 < 90^\circ$ ) を超えると漏れ光が生じるので、伝播角  $\phi$  がその最大値  $\phi_0$  を超えない範囲で急激曲げが可能になる。

#### 【0076】

請求項33に係る発明は、請求項30又は31に記載の均質媒体導波路において、前記コア内を伝播する波動が前記側面に、前記一方向に垂直な方向（XZ平面方向）において垂直入射して反射する場合の位相変化量が  $s\pi$  であり、 $0 \leq s \leq 1$  の範囲にあるとすると、

$$n_s - n_0 \sin \psi < 0 \text{ と}$$

$$s \lambda_0 \cos \psi / 2 \leq 2L$$

を満たすことを要旨とする。

#### 【0077】

この構成によれば、以下の必要条件を満たすことで、均質媒体導波路を「完全閉じ込め多モード導波路」とすることができ、次のような作用効果が得られる。

・伝播角  $\phi$  によらず光が閉じ込められるので、共振器などに適する。導波路幅は一定である必要も無く、上限も無いので、自由な形状の共振器とすることができる。

#### 【0078】

請求項34に係る発明は、請求項33に記載の均質媒体導波路において、前記コアの前記横幅  $2L$  は、

$$s \lambda_0 \cos \psi / 2 \leq 2L < (s+1) \lambda_0 \cos \psi / 2$$

の範囲にあることを要旨とする。

#### 【0079】

この構成によれば、導波路幅  $2L$  は、前記一方向に垂直な方向（XZ平面方向）の伝播角  $\phi$  の値にかかわらず、位相整合条件における0次モードのみ存在する範囲にある。このような「完全閉じ込め単一モード導波路」では、次のような作用効果が得られる。

#### 【0080】

・単一モード伝播のまま急激曲げが可能で、導波路幅も細いので、素子を極めて小型にまとめることができる。



請求項 35 に係る発明は、請求項 30～34 のいずれか一つに記載の均質媒体導波路において、以下の数式において  $n_0$  は前記コアの屈折率、 $n_m$  は入射光側の屈折率、 $\psi$  は前記コア内を伝播する高次モード光の伝播角とすると、前記コアの前記一方向と平行な端面に、

$$\sin \theta = (n_0 / n_m) \sin \psi$$

の数式で表わす前記一方向における入射角  $\theta$  の外部平面波を結合させて、前記外部平面波を入射光もしくは出射光となすことを要旨とする。

#### 【0081】

この構成によれば、入射光を、特定の高次モード伝播光（伝播角  $\psi$ ）と結合させることができる。

請求項 36 に係る発明は、請求項 30～34 のいずれか一つに記載の均質媒体導波路において、前記コアの前記一方向に対して傾いた斜め端面に、前記コア内を伝播する前記一方向における高次モード光の伝播角  $\psi$  に結合する入射角を有する外部平面波を結合させて、前記外部平面波を入射光もしくは出射光となすことを要旨とする。

#### 【0082】

この構成によれば、入射光を、伝播角  $\psi$  の値が大きい特定の高次モード伝播光と結合させることができる。

請求項 37 に係る発明は、請求項 30～34 のいずれか一つに記載の均質媒体導波路において、前記コアの前記一方向に対して傾いた斜め端面に接触あるいは近接したプリズムもしくは鏡面を設置して、前記コア内を伝播する前記一方向における高次モード光と外部平面波を結合させて、前記外部平面波を入射光もしくは出射光となすことを要旨とする。

#### 【0083】

この構成によれば、コアの斜め端面に外部平面波を入射させる場合に、その入射光の向きをプリズムもしくは鏡面によって変えることができる。

請求項 38 に係る発明は、請求項 37 に記載の均質媒体導波路において、前記外部平面波の入射方向もしくは出射方向を導波路内での伝播方向と一致させることを要旨とする。

#### 【0084】

この構成によれば、外部平面波の入射方向もしくは出射方向をコア内での伝播方向と一致させるので、他の導波路素子や光ファイバーとの結合が容易になる。

請求項 39 に係る発明は、請求項 37 に記載の均質媒体導波路において、前記外部平面波の入射方向もしくは出射方向を導波路内での伝播方向と垂直にすることを要旨とする。

#### 【0085】

この構成によれば、外部平面波を均質媒体導波路が形成される基板の上面と垂直な方向から入射させもしくはその垂直な方向へ出射させることができる。

請求項 40 に係る発明は、請求項 37 に記載の均質媒体導波路において、前記プリズムの屈折率を 3 以上とすることを要旨とする。

#### 【0086】

この構成によれば、外部平面波の周波数が設計周波数から離れても結合バンドの位置の、ブリルアンゾーンの上側の境界線上からのずれを小さくすることができ、境界線での伝播が起こる周波数帯域を広く取ることができる。

#### 【0087】

請求項 41 に係る発明は、請求項 30～34 のいずれか一つに記載の均質媒体導波路において、前記コアの前記一方向に対して傾いた斜め端面に、近接もしくは接触もしくは一体化した回折格子を設置することを要旨とする。

#### 【0088】

この構成によれば、ブリルアンゾーンの境界線での伝播が起こる周波数帯域を広く取ることができる。回折格子は、特定の次数の回折光が強くなるように、プレーズ形状などの設計を行なうことが望ましい。

#### 【0089】

請求項 42 に係る発明は、請求項 41 に記載の均質媒体導波路において、外部平面波の



入射方向もしくは出射方向を導波路内での伝播方向と一致させることを要旨とする。

この構成によれば、外部平面波の入射方向もしくは出射方向をコア内での伝播方向と一致させるので、他の導波路素子や光ファイバーとの結合が容易になる。

【0090】

請求項43に係る発明は、請求項30～34のいずれか一つに記載の均質媒体導波路において、前記コアの前記一方と平行な端面に、近接あるいは接触あるいは一体化した位相格子を備え、外部の平面波と前記位相格子による回折光を前記コア内を伝播する前記一方における高次モード光と結合させて、前記平面波を入射光もしくは出射光となすことを要旨とする。

【0091】

この構成によれば、端面に垂直入射する入射光を、特定の高次モード伝播光と結合させることができる。

請求項44に係る発明は、請求項30～43のいずれか一つに記載の均質媒体導波路において、前記コアの導波路長さ方向と垂直な方向における横幅をテーパ状に変化させたことを要旨とする。

【0092】

この構成によれば、コアの前記横幅（導波路幅 $2L$ ）を、例えばその入射部分の導波路幅を多モード伝播条件となる広さとし、途中でテーパ状に横幅を狭くして単一モード導波路に変換するような「テーパ導波路」にすることができる。このように単一モード条件を満たすコアの前記横幅を、コアの入射面の近くでテーパ状に拡大すると、外部との接続効率を改善することができる。

【0093】

請求項45に係る発明は、請求項1～44のいずれか一つに記載のフォトニック結晶導波路或いは均質媒体導波路を用いた光学素子であって、所定の結合長の結合領域で近接するように屈曲して形成された2つの導波路を有する方向性結合器として構成され、前記2つの導波路を前記フォトニック結晶導波路或いは前記均質媒体導波路のいずれかで構成したことを要旨とする。

【0094】

この構成によれば、以下の作用効果が得られる。

- ・方向性結合器の2つの導波路が前記フォトニック結晶導波路或いは前記均質媒体導波路のいずれかで構成されているので、各導波路の急激曲げが可能であり、基板上における各導波路の配置の自由度が増す。このため、方向性結合器自体の小型化が可能になるとともに、集積化が容易になる。

【0095】

- ・各導波路の結合領域前後の屈曲部において急激曲げが可能になるので、各導波路全体の長さを、上記特許文献2のような従来技術より大幅に短くすることができる。

- ・各導波路を、上述した完全閉じ込め条件を満たすように作製することで、伝播損失が小さくかつ低コストの方向性結合器を実現することができる。

【0096】

- ・各導波路を、上述した単一モード条件を満たすように作製することで、外部の単一モード光ファイバと効率良く結合させることが可能になる。

- ・各導波路では、大きい分散や遅い群速度の伝播光が得られる。そのため、2つの導波路の結合領域の結合長を従来の方向性結合器の導波路よりもはるかに短くすることができ、小型化を図ることができるとともに、方向性結合器の機能を高めることができる。

【0097】

- ・各導波路をフォトニック結晶導波路とする場合、単純な周期的多層膜構造である1次元フォトニック結晶を基本構造とし、フォトニック結晶の屈折率差が小さくても良いので、方向性結合器を低コストで製作することができる。

【0098】

請求項46に係る発明は、請求項1～44のいずれか一つに記載のフォトニック結晶導

波路或いは均質媒体導波路を用いた光学素子であって、一つの直線状の導波路（351）と、この導波路から分岐した2つの導波路と、これら2つの導波路が合流した一つの直線状の導波路と有するマッハツェンダー型光スイッチとして構成され、前記各導波路を、前記フォトニック結晶導波路或いは前記均質媒体導波路のいずれかで構成したことを要旨とする。

#### 【0099】

この構成によれば、以下の作用効果が得られる。

・マッハツェンダー型光スイッチの各導波路は前記フォトニック結晶導波路或いは均質媒体導波路で構成されているので、各導波路の急激曲げが可能であり、基板上における各導波路の配置の自由度が増す。このため、上記特許文献3のような2次元フォトニック結晶を有する光スイッチと比べて、光スイッチ自体の小型化が可能になるとともに、基板上に他の素子と共に集積化して光モジュールを作製する際の集積化が容易になる。

#### 【0100】

・特許文献3のような光スイッチでは、平面方向（XZ方向）の閉じ込めはPBGにより行なわれているが、上下方向（Y方向）の閉じ込めはより困難であり、伝播損失が大きくなる。また、その欠陥導波路では、いわゆる「エアーブリッジ構造」などが知られているが、構造、工程ともに複雑となり、コスト高の原因となるという問題があった。したがって、このような従来の欠陥導波路を用いてマッハツェンダー型光スイッチを作製すると、伝播損失が大きく、コスト高になってしまう。これに対して、各導波路を構成するフォトニック結晶導波路或いは均質媒体導波路を、上述した完全閉じ込め条件を満たすように作製することで、伝播損失が小さくかつ低コストの方向性結合器を実現することができる。

#### 【0101】

・各導波路を構成するフォトニック結晶導波路或いは均質媒体導波路を、上述した単一モード条件を満たすように作製することで、外部の単一モード光ファイバと効率良く結合させることが可能になり、単一モード光ファイバを用いた光システムを実現することができる。

#### 【0102】

・各導波路をフォトニック結晶導波路とする場合、周期的積層構造である1次元フォトニック結晶を基本構造とし、フォトニック結晶の屈折率差が小さくても良いので、マッハツェンダー型光スイッチを低コストで製作することができる。

#### 【0103】

請求項47に係る発明は、請求項1～44のいずれか一つに記載のフォトニック結晶導波路或いは均質媒体導波路を用いた光学素子であって、直線状の導波路と遅延部分を含む一つの導波路を有する光遅延線として構成され、前記導波路と遅延部分を前記フォトニック結晶導波路或いは前記均質媒体導波路のいずれかで構成されていることを要旨とする。

#### 【0104】

この構成によれば、以下の作用効果が得られる。

・導波路と遅延部分を含む一つの導波路に、閉じ込めの強いフォトニック結晶導波路或いは均質媒体導波路のいずれかを用いているので、自由な形状の導波路とすることができる。従って、急峻曲げにこだわらず、わずかな曲率半径を持たせることによって曲げ損失を改善可能となり、小型化と低損失化を同時に実現する光遅延線を設計することができる。

#### 【0105】

・光遅延線を、1次元フォトニック結晶によるフォトニック結晶導波路或いは均質媒体導波路を用いて低コストで実現することができる。

・遅延部分の急激曲げが可能であり、基板上における光遅延線の配置の自由度が増す。このため、光遅延線自体の小型化が可能になるとともに、基板上に他の素子と共に集積化して光モジュールを作製する際の集積化が容易になる。

#### 【0106】

・前記一つの導波路を構成するフォトニック結晶導波路或いは均質媒体導波路を、上述した単一モード条件を満たすように作製することで、外部の単一モード光ファイバと効率良く結合させることが可能になり、単一モード光ファイバを用いた光システムを実現することができる。

【0107】

・前記一つの導波路をフォトニック結晶導波路とする場合、単純な周期的多層膜構造である1次元フォトニック結晶を基本構造とし、フォトニック結晶の屈折率差が小さくても良いので、光遅延線を低コストで製作することができる。

【0108】

・長い経路の遅延部分を基板上に小さな面積で配置することができ、小型化と集積化とをさらに図ることができる。

請求項48に係る発明は、請求項1～44のいずれか一つに記載のフォトニック結晶導波路或いは均質媒体導波路を用いた光学素子であって、前記フォトニック結晶導波路或いは前記均質媒体導波路のいずれかで構成した導波路を備えた分散制御素子として構成され、前記導波路を伝播する伝播光として分散の大きい条件の伝播光を用いることを要旨とする。

【0109】

この構成によれば、分散の大きい条件の伝播光を用いることにより、光通信システムにおいて分散の生じた信号に逆の分散を与えることができ、長距離の光ファイバによる波長分散を補償することができる。

【0110】

請求項49に係る発明は、請求項1～44のいずれか一つに記載のフォトニック結晶導波路或いは均質媒体導波路を用いた光学素子であって、前記フォトニック結晶導波路或いは前記均質媒体導波路のいずれかで構成した導波路を備え、前記導波路のコアに非線形特性を有する物質を含ませてあり、前記導波路の前記一方向における両側表面に2つの電極を設けた電極付導波路素子として構成したことを要旨とする。

【0111】

この構成によれば、電極に印加する電圧や電流を制御することにより、フォトニック結晶導波路或いは前記均質媒体導波路のいずれかで構成した導波路のコアに含ませてある非線形物質の非線形作用を制御することができる。これにより、群速度異常による非線形効果を可変にできるとともに、非線形効果の大きい非線形素子を実現することができる。

【0112】

請求項50に係る発明は、請求項1～44のいずれか一つに記載のフォトニック結晶導波路或いは均質媒体導波路を用いた光学素子であって、前記フォトニック結晶導波路或いは前記均質媒体導波路のいずれかで構成した導波路を備え、前記導波路のコアに非線形特性を有する物質を含ませてあり、前記導波路の前記一方向における両側表面に2つの電極を設けた電極付導波路素子として構成し、前記2つの電極に印加する電圧や電流を変化させる変調器を備えることを要旨とする。

【0113】

この構成によれば、前記導波路の前記一方向における両側表面に設けた2つの電極に印加する電圧や電流を変調器により変化させることにより、入射光に位相、振幅、偏波面、周波数などの変調を加えた変調された信号光を出射させることができる。

【0114】

請求項51に係る発明は、請求項1～43のいずれか一つに記載のフォトニック結晶導波路或いは均質媒体導波路を用いた光学素子であって、前記クラッドの閉じ込めを不完全とすることによって発生する前記コアからの屈折光を利用することを要旨とする。

【0115】

この構成によれば、クラッドの閉じ込めを不完全にすることで、伝播光の一部は空気側或いは基板側への屈折光となる。この屈折光の方向は外部平面波の真空中での波長に対して一定であり、指向性の非常に良い光束となる。プリルアンゾーン境界線上のバンドを

利用することによって、外部平面波の周波数変化に対して実効屈折率が大きく変化するため、高分解能の分波素子として利用することができる。

【発明の効果】

【0116】

以上説明したように、本発明によれば、急激曲げや自由な角度での配置が可能なフォトニック結晶導波路、均質媒体導波路、および、これらの導波路を用いた各種の光学素子を得ることができる。

【発明を実施するための最良の形態】

【0117】

本発明の各実施形態に係るフォトニック結晶導波路、均質媒体導波路、およびこれらを用いた光学素子を説明する前に、各実施形態で用いる1次元フォトニック結晶について説明する。

【0118】

〔1次元フォトニック結晶〕

図1は、一方向（Y方向）にのみ周期性を有する1次元フォトニック結晶50の、周期性のない方向（Z方向）における電磁波の伝播を模式的に示している。

【0119】

この1次元フォトニック結晶50は、例えば厚さ $t_A$ の媒体A（屈折率 $n_A$ ）と厚さ $t_B$ の媒体B（屈折率 $n_B$ ）を交互に積み重ねた周期 $a = (t_A + t_B)$ をもった周期的多層膜である。

【0120】

図1において、1次元フォトニック結晶50の一端面50aから真空中の波長 $\lambda_0$ の平面波（電磁波）である入射光51を入射させたとき、この入射光51は伝播光52となってフォトニック結晶50内を伝播し、他端面50bから出射される出射光53となる。その入射光51が1次元フォトニック結晶50内でどのように伝播するかは、フォトニックバンドを計算してバンド図を作成することにより知ることができる。なお、1次元フォトニック結晶50において、それぞれ外部との「結合面」である一端面50aおよび他端面50bは、周期性が露出する端面でありかつ周期方向（一方向）であるY方向と平行な端面であり、それぞれ入射面および出射面となっている。

【0121】

バンド計算の方法は、例えば"Photonic Crystals", Princeton University Press (1995) あるいは、Physical Review B 44巻, 16号, p.8565, 1991年、などに詳しく記載されている。

【0122】

バンド計算に際しては、図1に示す1次元フォトニック結晶50は、Y方向（積層方向）には無限に続く周期構造を有し、紙面に垂直なX方向およびZ方向（周期的多層膜の各層面の広がる方向）には無限に広がっているものと仮定する。

【0123】

図2は、

屈折率 $n_F = 2.1011$  ( $t_F = 0.3a$ )

屈折率 $n_G = 1.4578$  ( $t_G = 0.7a$ )

の層を交互に重ねた周期 $a$ の多層構造体（1次元フォトニック結晶50）について、Y方向およびZ方向におけるバンド計算の結果を、TE偏光の第1バンド、第2バンドおよび第3バンドについて第1ブリルアンゾーンの範囲内で示したものである。図2に示すバンド図は、規格化周波数 $\omega a / 2\pi c$ が同じ値になる点を結ぶことによって等高線状となり、図中の添字は、 $\omega a / 2\pi c$ の値をそれぞれ意味する。ここで、 $\omega$ は入射光51の角振動数、 $a$ は多層構造体（1次元フォトニック結晶50）の周期、 $c$ は真空中の光速である。

【0124】

規格化周波数 $\omega a / 2\pi c$ は、真空中の入射光の波長 $\lambda_0$ を用いて、 $a / \lambda_0$ とも表わ

することができるので、以下では規格化周波数を簡単に  $a/\lambda_0$  と記述する。

図2に示すブリルアンゾーンのY方向の幅は、 $2\pi/a$ であるが、フォトニック結晶50はZ方向に周期性がないので、図1でX方向（紙面に垂直な方向）およびZ方向を含む横方向にはブリルアンゾーンの境界が存在せず、ブリルアンゾーンはどこまでも広がっている。また、TE偏光は電場の向きがX方向である偏光を表わす。TM偏光（磁場の向きがX方向である偏光）のバンド図（図示省略）は、TE偏光のものに類似しているが、幾分異なった形状となる。

#### 【0125】

このような図1に示す1次元フォトニック結晶50の一端面50aに入射した平面波である入射光51について、フォトニック結晶50内での伝播光52を考える。

図3は、特定の規格化周波数  $a/\lambda_0$  の平面波（TE偏光）を、1次元フォトニック結晶50の一端面50aからその一端面に垂直に入射させた場合の伝播を模式的に示している。つまり、1次元フォトニック結晶50の一端面50aに垂直入射した入射光（平面波）51とフォトニック結晶50との結合をフォトニックバンドで示している。

#### 【0126】

入射側の均質物質の屈折率を  $n$  とすると、その均質物質のバンド図は、

半径  $= n \cdot (a/\lambda_0)$  （単位は  $2\pi/a$ ）

の円となるので、作図によってフォトニック結晶50側の結合バンドを求めることができる。図3においては、第1バンドおよび第2バンド上に対応点911、912があるので、フォトニック結晶50内において第1バンドおよび第2バンドにそれぞれ対応した波動が伝播することになる。各伝播光の波数ベクトルを符号913および914で示す。フォトニック結晶50内における波動エネルギーの進行方向は等高線の法線方向915および916で表わされ、いずれのバンドによる伝播光もZ方向に進む。

#### 【0127】

図3の場合について、バンド図をZ方向に限定して示したものが図4である。

図4に示すように、図1に示す入射光51の真空中の波長が  $\lambda_0$  の場合、フォトニック結晶50内では第1バンド、第2バンドに対応する波数ベクトル  $k_1$ 、 $k_2$  が存在する。換言すると、規格化周波数  $a/\lambda_0$  の入射光（平面波）51は、

$$\lambda_1 = 2\pi/k_1 \text{ および}$$

$$\lambda_2 = 2\pi/k_2$$

の2つの波動としてフォトニック結晶50内をZ方向に伝播する。

#### 【0128】

ここで、真空中での波長  $\lambda_0$  を、対応するフォトニック結晶50中での波長（ $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$  など）で除した値を「実効屈折率」と定義する。図4から理解できるように、第1バンドの規格化周波数  $a/\lambda_0$  と波数ベクトル  $k_z$  はほぼ比例するため、第1バンドでは実効屈折率も入射光51の波長  $\lambda_0$  の変化に対してほとんど不変である。しかし、第2バンド以上の高次バンドでは、実効屈折率が  $\lambda_0$  の変化により大きく変化し、図4から明らかにように実効屈折率が1未満になることもある。

#### 【0129】

また、図4で示すようなバンド曲線を  $k_z$  で微分した値（接線の傾き）が伝播光の群速度となることは良く知られている。図4に示す場合、第2バンド以上の高次バンドでは、 $k_z$  の値が小さくなるにつれて接線の傾きは急速に小さくなり、 $k_z = 0$  のときその傾きは0となる。これが、フォトニック結晶に特有の群速度異常である。フォトニック結晶における群速度異常は極めて大きく、かつ通常の均質物質の分散とは逆（入射光の波長が長くなるにつれて群速度が遅くなる）なので、高次バンド伝播光の群速度異常を利用して光遅延素子や分散制御素子などの光学素子を作ることができる。

#### 【0130】

以上述べたように、高次バンドによる伝播光（高次バンド伝播光）を利用する光学素子は非常に有用なものである。しかし、第2バンド以上の高次バンド伝播光が伝播する規格化周波数  $a/\lambda_0$  の場合に必ず第1バンド伝播光（第1バンドによる伝播光）も伝播して

いる。このことは、図4において、各バンドを示す直線や曲線は実際には同図の右にもっと広がっていることから明らかである。

#### 【0131】

なお、第1バンド伝播光は上述した「非常に大きい波長分散」（周波数の変化に対する伝播光の波長（ $2\pi/kz$ ）の変化が大きくなること）、「群速度異常」といった効果がほとんどない。このため、高次バンド伝播光と第1バンド伝播光とが存在する場合、第1バンド伝播光は、高次バンド伝播光を利用する場合には単なる損失でしかなく、入射光エネルギーの利用効率を大きく低下させてしまうだけでなく、迷光として光学素子のS/N比を低下させる原因ともなる。

#### 【0132】

ところが、本発明者らの研究によって、入射光に位相変調を加えることで、周期的多層膜である1次元フォトニック結晶内を高次バンド伝播光のみを伝播させることが可能であることが明らかになった。また、フォトニック結晶内をZ方向に進む高次バンド伝播光は、ブリルアンゾーンの境界線上のバンドを利用しても得ることができる、ことが明らかになった。

#### 【0133】

図5は、図1に示すフォトニック結晶50の一端面50aに入射光51が角度 $\theta$ で斜め入射する場合の、フォトニック結晶50側の結合バンド（フォトニックバンド）を示している。図5においては、第1バンドおよび第2バンド上に対応点531、532があるので、フォトニック結晶50内において第1バンドおよび第2バンドにそれぞれ対応した波動が伝播することになる。各伝播光の波数ベクトルを符号533および534で示す。このような斜め入射の場合、フォトニック結晶50内を伝播する波動の進行方向は等高線の法線方向535、536となるので2種類あり、それぞれZ方向にはならない。

#### 【0134】

ところで、一端面50aへの入射角 $\theta$ を

$$n \cdot \sin \theta \cdot (a/\lambda_0) = 0.5$$

を満たすように設定すると、ブリルアンゾーンの境界線100a、100b上に第1バンド伝播光と第2バンド伝播光（高次バンド伝播光）とが存在する（図6参照）。図6においては、第1バンドおよび第2バンド上に対応点611、612があるので、フォトニック結晶50内において第1バンドおよび第2バンドにそれぞれ対応した波動が伝播することになる。各伝播光の波数ベクトルを符号613および614で示す。ブリルアンゾーンの境界線100a、100bでの対称性より、2つの伝播光の波動エネルギーの進行方向615および616はZ方向に一致しているので、各伝播光はZ方向に進行する。

#### 【0135】

Z方向への伝播を実現するためには、ブリルアンゾーンのY方向の周期性より

$$n \cdot \sin \theta \cdot (a/\lambda_0) = 1.0, 1.5, 2.0, \dots$$

を満たす条件でも良いが、値が増えるにつれて $n$ および $\theta$ を大きい値とする必要があるもので、その実現が難しくなる。

#### 【0136】

図6の場合について、ブリルアンゾーンの境界線上のバンド図をZ方向に限定して示したものが図7である。図7に示すように、図6に示すブリルアンゾーンの境界線100a、100b上では、第1バンドを含む全てのバンドが図4に示す高次バンドと同様な変化をなす。したがって、全てのバンドにおいて「実効屈折率の波長による大きな変化」や「群速度異常」が起こるので、これらの特性を利用して光遅延素子や分散制御素子などの光学素子を、入射光エネルギーの利用効率やS/N比を低下させずに作ることができる。

#### 【0137】

本発明者らの研究によると、フォトニック結晶外部の平面波、例えばフォトニック結晶50（図1参照）に入射する平面波（入射光51）と、フォトニック結晶50内部をZ方向に進む高次伝播光とを結合させるいくつかの方法が明らかとなっているので、以下にその方法について説明する。

## 【0138】

(1) <ブリルアンゾーンの中心線上のバンドを利用する場合>

ここで、「ブリルアンゾーンの中心線上のバンド」とは、フォトニックバンド構造におけるブリルアンゾーンの中心線上に存在するフォトニックバンドをいう。例えば、図3に示すフォトニックバンド構造におけるブリルアンゾーンの中心線60上の第1バンドやブリルアンゾーンの中心線61上の第2バンドが、その中心線上に存在するフォトニックバンドに相当する。

## 【0139】

周期aのフォトニック結晶（例えば図1に示すフォトニック結晶50）に対して、同じ方向に周期aを有する適当な位相変調波を入射させると、特定の高次バンドに属する伝播光のみを得ることができる。また、光路を逆に考えると、高次バンド伝播光がフォトニック結晶50の他端面50bから出射された後に適当な位相変調手段を設置することにより、その伝播光を平面波に戻すことができる。

## 【0140】

例えば、図8に示すように、2方向の平面波62a, 62bを交差させて、Y方向に周期aを有する干渉波を作り、そこに図1に示すようなフォトニック結晶50の一端面50aを設置すれば、入射光エネルギーの大部分を高次バンド伝播光にすることができる。なお、図8に示すように、高次バンド伝播光が伝播しているフォトニック結晶50による導波路の左右表面（X方向と垂直な断面）では、「電場パターン」が露出している。図8では、太い実線で示す電場の山98は細い実線で示す電場の山99よりも振幅が大きいことを示している。また、図8は、フォトニック結晶50を構成する周期的多層膜のうち、屈折率の異なる隣接する各層で電場の山98と電場の山99とが互いに「半波長だけ」ずれていることを示している。

## 【0141】

高次バンド伝播光の割合を図8の場合よりもさらに大きくするために、図9に示すように、入射させる平面波を図8の場合よりも増やすことも考えられる。例えば、3方向の平面波62a, 62b, 62cをフォトニック結晶50の一端面50aに入射させる。また、図10に示すように、フォトニック結晶50の一端面50aの直前に周期aの位相格子64を設置し、平面波の入射光51'を位相格子64により位相変調して周期aの位相変調波65を作り、この位相変調波65を入射させる。これにより、図8に示す場合と同様に入射光エネルギーの大部分を高次バンド伝播光とすることができる。この場合の位相格子64は、例えばフォトニック結晶50の一端面50a近くに溝を形成する、という簡便な方法によっても作ることができる。

## 【0142】

フォトニック結晶50の他端面50bからの出射光は、その他端面50bから直接出射する場合には他端面50bの周期構造による回折が発生する。例えば、図8に示すように、その出射光は、他端面50bの周期構造により回折光66a, 66bとなってしまう。しかし、図10に示すようにフォトニック結晶50の一端面50aの直前に設置した周期aの位相格子64と同様の位相格子67を、図9および図10に示すようにフォトニック結晶50の他端面50bの直後に設置することにより、出射光68を位相格子67により平面波69に戻すことができる。

## 【0143】

(2) <ブリルアンゾーンの境界線上のバンドを利用する場合>

図6および図7に示すような「ブリルアンゾーンの境界線100a, 100b上における伝播」を実現する方法として、以下のような方法がある。

## 【0144】

(2a) 斜め入射による複数バンド伝播

図6および図7に示すように、第1バンドと第2バンドの両方が存在する周波数域において、フォトニック結晶の端面、例えば、図1に示すフォトニック結晶50の一端面50aに斜め入射する光（入射光51）の入射角 $\theta$ を



$$n \cdot \sin \theta \cdot (a/\lambda_0) = 0.5$$

の条件を満たすように設定することにより、第1バンドと第2バンドによる伝播を重ね合わせた波動を得ることができる。この場合、次のような伝播が得られる。

#### 【0145】

○第1バンド伝播光は、図11の左側に示すように、高屈折率層を腹、低屈折率層を節とする。つまり、フォトニック結晶50の高屈折率層104に電場の山106と電場の谷107が存在し、その低屈折率層105に電場の節が存在する。

#### 【0146】

○第2バンド伝播光は、図11の右側に示すように、低屈折率層を腹、高屈折率層を節とし、その周期は第1バンドによる伝播光よりも長い。つまり、フォトニック結晶50の低屈折率層105に電場の山106と電場の谷107が存在し、その高屈折率層104に電場の節が存在し、電場の山106と谷107の周期は第1バンドによる伝播光よりも長い。

#### 【0147】

○第1バンド伝播光と第2バンド伝播光とが重なると、図12に示すように、斜めに進行するように見える「見かけの波面」が発生し、その向きが周期的に入れ換わるようになる。

#### 【0148】

このようにして第1バンドと第2バンドによる伝播を重ね合わせた波動を得る方法は、入射光（平面波）を傾けるだけなので最も簡便である。さらに、 $a/\lambda_0$ の値を大きくすれば、第3バンド以上の高次バンドによる伝播光も加えることができる。

#### 【0149】

しかし、本方法では、2種類あるいはそれ以上のバンドによる伝播光が混ざってしまう。これらの伝播光は、フォトニック結晶内の波長や群速度が異なるので、これらの特性が単一であることが必要な光学素子を構成する場合は大きな支障となる。したがって、本方法は、「伝播光の群速度が遅くなって非線形作用が大きくなるだけで良い」といった用途には特に好適である。

#### 【0150】

(2b) 斜め入射による第1バンドの伝播

図13に示すように、第1バンドのみが存在する周波数域（その周波数に対応する第2バンドが存在しない）において、フォトニック結晶の端面、例えば、図1に示すフォトニック結晶50の一端50aに斜めに入射する光（入射光51）の入射角 $\theta$ を

$$n \cdot \sin \theta \cdot (a/\lambda_0) = 0.5$$

の条件を満たすように設定する。これにより、単一のバンド（第1バンド）による伝播（波数ベクトル132）を得ることができる。図13において、符号131は第1バンド上の対応点を、符号133

は第1バンドにおける波動の進行方向をそれぞれ示す。第2バンド上には対応点が存在しないので、伝播はない。

#### 【0151】

本方法では、入射光（平面波）を傾けるだけなので、上記(2a)の方法と同様に簡便である。しかし、「第1バンドのみが存在する周波数域」は $a/\lambda_0$ の値が小さいので、入射角 $\theta$ と屈折率 $n$ を共に大きくする必要があり、フォトニック結晶50の一端50aでの反射率が相当大きくなりロスが増える点が問題となる。

#### 【0152】

(2c) 平面波の干渉による入射光の位相変調

図14に示すように、同一波長の平面波62a, 62bを、それぞれ入射角 $\pm\theta$ として交差させてフォトニック結晶の端面に入射させると、干渉により節と腹のある電場パターンが形成される。そこで、電場の山106と電場の谷107が高屈折率層104に存在し、節が低屈折率層105に存在するようにフォトニック結晶50を配置すると、図11で示す第1バンドによる伝播の場合と同様に、第1バンドによる伝播光のみが発生する。ま



た、電場の山 106 と電場の谷 107 が低屈折率層 105 に存在し、節が高屈折率層 104 に存在するようにフォトニック結晶 50 を配置すると、図 11 で示す第 2 バンドによる伝播の場合と同様に、第 2 バンドによる伝播光のみが発生する。

#### 【0153】

入射角  $\theta$  の値が

$$n \cdot \sin \theta \cdot (a/\lambda_0) = 0.5$$

の関係でなければならないことは、図 14 より明らかである。ただし、 $n$  は入射光側の屈折率である。

#### 【0154】

(2d) 位相格子の設置による入射光の位相変調

図 15 に示すように、フォトニック結晶 50 の周期  $a$  の 2 倍の周期  $2a$  を有する位相格子 70 に平面波の入射光 51' を垂直入射させると、+1 次回折光と -1 次回折光との干渉により、図 14 に示す上記 (2c) の方法による「平面波による干渉」の場合と同様な腹（電場の山と谷）と節のある電場パターンを作ることができる。ここで、電場の山 106 と電場の谷 107 が高屈折率層 104 に存在し、節が低屈折率層 105 に存在するようにフォトニック結晶 50 を配置すると、第 1 バンドによる伝播光のみが発生する。一方、電場の山 106 と電場の谷 107 が低屈折率層 105 に存在し、節が高屈折率層 104 に存在するようにフォトニック結晶 50 を配置すると、第 2 バンドによる伝播光のみが発生する。

#### 【0155】

位相格子 70 による 0 次光や 2 次以上の回折光が混じるとフォトニック結晶 50 の特定バンドとうまく結合しないので、+1 次回折光と -1 次回折光が共に 50 % の回折効率となることが理想である。したがって、位相格子 70 は、±1 次回折光ができるだけ強くなるように最適化した形状であることが望ましい。

#### 【0156】

また、位相格子 70 を特定の波長で最適化した場合は、波長が多少変わっても 1 次回折光の効率は急激に低下せず、高いレベルに留まるので、本方法は使用できる周波数帯域を他の方法よりも広くとることができる。

#### 【0157】

なお、図 15 で符号 65' は位相格子 70 による位相変調波である。また、位相格子 70 と同様に周期  $2a$  を有する位相格子 71 をフォトニック結晶 50 の他端面 50b の直後に設置することにより、出射光 68' を平面波 69' に戻すことができる。

#### 【0158】

(2e) 周期  $a$  の位相格子と斜め入射光による干渉波の利用

上記 (2a) の方法により第 1 バンド伝播光と第 2 バンド伝播光とが共存する（重なるような）フォトニック結晶 50 内の伝播光は、位相格子の出射側の端面（他端面 50b）の位置によって出射する回折光の強度を変えることができる。すなわち、図 16 の位置 H および J で示すように、位相格子の出射側の端面が山谷パターンの斜面にあると、片側の回折光が強くなる。また、図 16 の位置 I で示すように、位相格子の出射側の端面が山谷パターンの頂点あるいは底にあると、両側回折光の強度がほぼ等しくなる。両側回折光の強度がほぼ等しくなる出射光による干渉パターンは、上記 (2d) の方法の場合に位相格子により作り出した干渉波と同様なものなので、位相格子の出射側の端面の直後に位相格子と同じ周期  $a$  のフォトニック結晶を設置すると、特定の高次バンドによる高次伝播光を得ることができる。

#### 【0159】

本方法では、位相格子およびフォトニック結晶として、同じ構造（当然周期も同じ  $a$ ）の周期的多層膜などを用いることができるが、干渉波による電場の腹（山および谷）と節の位置をフォトニック結晶側と合わせるための調整は必要となる。また、

$$n \cdot \sin \theta \cdot (a/\lambda_0) = 0.5$$

の条件を満たすのが望ましいことは言うまでもない。

## 【0160】

(2f) 周期  $2a$  の位相格子と斜め入射による干渉波の利用

上記(2d)の方法による場合、 $a/\lambda_0$ の値が0.5未満になると、例えば、石英／空気といった低屈折率物質で構成した位相格子では、±1次回折光の強度を大きくするのが困難になってくる。シリコンなどの高屈折率材料で位相格子を構成すれば、±1次回折光の強度を大きくすることができるが、反射光が多くなるか、あるいは位相格子の作製が困難になるといった問題が生じる。

## 【0161】

しかし、位相格子の周期をフォトニック結晶の2倍の $2a$ とするとともに、

$$n \cdot \sin \theta \cdot (a/\lambda_0) = 0.5$$

の条件に近い斜め入射光とすれば、 $a/\lambda_0$ の値が0.5未満の小さい値であっても、図17に示すような干渉波を生じる回折光のペアを強くすることができる。

## 【0162】

このため、その直後に周期  $a$  のフォトニック結晶を設置すると、特定の高次バンドによる高次伝播光を得ることができる。本方法は、上記(2e)の方法に類似しているが、位相格子の周期が $2a$  (フォトニック結晶の周期の2倍)である点で(2e)の方法とは大きく異なる。

## 【0163】

次に、周期  $2a$  の位相格子と斜め入射による干渉波の利用による方法における、有限要素法による電磁波シミュレーションの結果を以下に示す。

(フォトニック結晶をなす周期的多層膜の構造)

媒体KとLを交互に重ねたもの。

## 【0164】

(媒体K) 厚さ  $t_K = 0.30a$  屈折率  $n_K = 2.1011$

(媒体L) 厚さ  $t_L = 0.70a$  屈折率  $n_L = 1.4578$

フォトニック結晶のバンド図は図2に示すものと同じである。

(位相格子の構造)

図17に示す位相格子110は、屈折率  $n = 2.00$  の媒体Mの表面に、周期  $2a$  の矩形の溝111を形成し、その溝111内に屈折率  $n = 1.00$  の空気が入っている構造である。媒体Mには、例えば後述する入射角  $\theta = 47.332^\circ$  に合わせた斜め端面112を設け、この端面112を斜めの入射面としている。また、位相格子110の端面には、屈折率  $n = 2.00$  の媒体Nの表面が接している。

## 【0165】

(媒体M) 矩形部分のY方向の厚さ  $t_M$  は  $1.6a$ 、屈折率  $n_M$  は  $2.00$ 、

(媒体N) 矩形部分の空気層のY方向の厚さ  $t_N$  は  $0.4a$ 、屈折率  $n_N$  は  $1.00$ 、

位相格子110のY方向周期は  $2a$ 、

位相格子110の、Z方向の厚さは  $1.5642a$  である。

## 【0166】

なお、位相格子の形状は、特定の回折光が強くなるように最適化した。

(入射光)

(真空中の波長  $\lambda_0$ )  $\lambda_0 = 2.941a$  のTE偏光 (電場の向きがX方向)  
( $a/\lambda_0 = 0.340$ )

(入射角  $\theta$ )  $\theta = 47.332^\circ$

なお、 $n \cdot \sin \theta \cdot (a/\lambda_0) = 0.5$  の条件を満足する。

(位相格子の設置)

位相格子110による干渉波を図17に示す。両側に広がる干渉波が強く、位相格子110と垂直に進む干渉波は弱いので、互い違いの干渉パターンとなっていることがわかる。図18に示す構成例では、図17に示す構成において、媒体Nに代えてフォトニック結晶50を用い、位相格子110とフォトニック結晶50を  $0.90909a$  の間隔で配置し、その隙間に屈折率  $n = 2.0$  の媒体113を充填している。そして、フォトニック結

晶50の高屈折率層の中心に干渉波の腹（電磁波の山と谷）がくるように位相格子110のY方向位置を調整した。フォトニック結晶50の一端面の入射部分の幅は約24周期とした。このような構成例のシミュレーション結果を図18に示す。

#### 【0167】

本シミュレーションでは、 $a/\lambda_0$ の値が小さいので、フォトニック結晶中を伝播する電磁波の波長は非常に長くなっている。

#### (2g) 斜め端面の利用

ブリルアンゾーンの境界線上の伝播光は、フォトニック結晶の入射側の端面を斜め端面とし、その斜め端面に平面波を入射させることによって得ることができる。

#### 【0168】

図19(a)に示すように、フォトニック結晶50の斜め端面（角度 $\psi_1$ ）50cに入射角 $\theta_0$ の入射光（平面波）80を入射させると、結合バンドの位置P（図19(b)参照）を作図によって求めることができる。その位置Pがブリルアンゾーンの境界線上にくるように $\psi_1$ と $\theta_0$ を調整すれば、Z方向に進行する高次伝播光81が得られる。

#### 【0169】

図73(a)は、図19(a)で説明したフォトニック結晶導波路と同様に、フォトニック結晶50の斜め端面（角度 $\psi_1$ ）50cに入射角 $\theta_0$ の入射光（平面波）80を入射させる構成例を示す説明図である。図73(b)は、図73(a)に示す構成例における、結合バンドの位置を作図で求めたバンド図である。図73(b)では、斜め端面50cに入射する入射光80が設計周波数の入射光である場合におけるフォトニックバンドとの結合状態を実線83で示し、その入射光80が設計周波数よりも周波数の小さい入射光である場合における同結合状態を破線84で示してある。破線85は、フォトニック結晶のバンド図の中心と、入射光を表わす円の中心を結ぶ線であり、斜め端面50cと同じ傾き角 $\psi_1$ を有する境界線89と直交する。

#### 【0170】

図73(b)から分かるように、実線83で示す入射光（設計周波数の入射光）の場合には、黒丸で示す結合バンドの位置（バンド上の結合点）87がブリルアンゾーンの境界線86上にくるように $\psi_1$ と $\theta_0$ を調整してある。この場合、フォトニック結晶50内をZ方向に進行する高次伝播光が得られる。これに対して、破線84で示す入射光（設計周波数よりも周波数の小さい入射光）の場合には、白丸で示す結合バンドの位置88がブリルアンゾーンの境界線86からずれていくことがわかる。

#### 【0171】

このように、図19(a)および図73(a)で示すように斜め端面50cに入射角 $\theta_0$ の入射光80を入射させる構成では、フォトニック結晶50側でブリルアンゾーンの境界線86での伝播が起こる周波数域が限られたものとなる。したがって、図19(a)および図73(a)で示すような構成は、周波数域が限定された用途に適している。

（斜め端面とプリズムの組み合わせ）

斜め端面を利用する場合、斜め端面50cの傾き角 $\psi_1$ によって入射光80の角度も決まってしまう、その向き（入射光80の角度）が実用上便利な方向とは限らない。そこで、斜め端面50cにプリズム或いはミラーを組み合わせると、入射光の向きを調整することができる。

#### 【0172】

プリズム或いはミラーと組み合わせたフォトニック結晶導波路の構成例のいくつかを図74(a)～(f)に基づいて説明する。

・図74(a)に示すフォトニック結晶導波路では、フォトニック結晶50の斜め端面50cと接触するように五角形のプリズム120Aを設置してある。このプリズム120Aにより、任意の角度（入射角 $\theta_0$ ）で同プリズムに入射する外部平面波である入射光80の入射方向（もしくは出射方向）を変化させて、フォトニック結晶50内をZ方向に進行する高次伝播光を得るように構成されている。なお、ここにいる「入射方向」は入射光80が入射する角度をいい、「出射方向」はその入射光がフォトニック結晶50内を伝播

して出射側のプリズム或いはミラーから出射する角度をいう。

【0173】

この構成例によれば、フォトニック結晶50の斜め端面50cに入射角 $\theta_0$ の入射光(平面波)80を入射させる場合に、入射光80の向きをプリズム120Aによって変えることができる。

【0174】

・図74(b)に示すフォトニック結晶導波路では、フォトニック結晶50の斜め端面50cと接触するように四角形のプリズム120Bを設置してある。このプリズム120Bにより、プリズム120Bに入射する入射光80の入射方向(もしくは出射方向)を、フォトニック結晶50内での入射光80の伝播方向(Z方向)と一致させるように構成されている。この構成例によれば、入射光80の入射方向(もしくは出射方向)をZ方向にしているので、他の導波路素子や光ファイバーとの結合が容易になる。

【0175】

・図74(c)に示すフォトニック結晶導波路では、フォトニック結晶50の斜め端面50cと接触するように四角形のプリズム120Cを設置してある。このプリズム120Cにより、入射光80の入射方向(もしくは出射方向)を、フォトニック結晶50内での入射光80の伝播方向(Z方向)と垂直にするように構成されている。この構成例によれば、入射光80をフォトニック結晶50が形成される基板の上面と垂直な方向から入射させることができる。

【0176】

・図74(d)に示すフォトニック結晶導波路では、斜め端面50cと接触するように三角形のプリズム120Dを設置してある。このプリズム120Dにより、プリズム120Dに入射する入射光80の入射方向(もしくは出射方向)を、図74(b)に示すフォトニック結晶導波路と同様に、フォトニック結晶50内での入射光80の伝播方向と一致させるように構成されている。この構成例によれば、他の導波路素子や光ファイバーとの結合が容易になる。

【0177】

・図74(e)に示すフォトニック結晶導波路では、斜め端面50cと接触するように五角形のプリズム120Eを設置してある。このプリズム120Eの全反射を利用して、プリズム120Eに入射する入射光80の入射方向(もしくは出射方向)を、図74(b)に示すフォトニック結晶導波路と同様に、フォトニック結晶50内での入射光80の伝播方向と一致させるように構成されている。この構成例によれば、他の導波路素子や光ファイバーとの結合が容易になる。

【0178】

・図74(f)に示すフォトニック結晶導波路では、フォトニック結晶50の斜め端面50cに近接するようにミラー121を設置してある。このミラー121の鏡面121aを用いて、ミラー121に入射する入射光80の入射方向(もしくは出射方向)を、フォトニック結晶50内での入射光80の伝播方向と一致させるように構成されている。ここで、ミラー121の鏡面121aは、金属表面や多層膜による鏡面である。この構成例によれば、他の導波路素子や光ファイバーとの結合が容易になる。

【0179】

図74(a)～(f)に示す上記各構成例では、屈折や反射により入射光80の方向を変えるので、周波数帯が限定されるという問題点は依然として残る。しかしながら、特に屈折率の高いプリズムを用いれば、周波数帯が限定されるという問題を軽減させることができる。

【0180】

図75(a)は、図74(d)で説明したフォトニック結晶導波路の構成例について、三角形のプリズム120Dに代えて、特に屈折率の高いプリズム122を用いた構成例を示している。図75(b)は、図75(a)に示す構成例における図73(b)と同様のバンド図である。図75(b)では、斜め端面50cに入射する入射光80が設計周波数

の入射光である場合におけるフォトニックバンドとの結合状態を実線 123 で示し、その入射光 80 が設計周波数よりも周波数の小さい入射光である場合における同結合状態を破線 124 で示してある。

#### 【0181】

図 75 (b) から分かるように、実線 123 で示す入射光 (設計周波数の入射光) の場合には、黒丸で示す結合バンドの位置 126 がブリルアンゾーンの上側の境界線 125 上にくるように  $\Psi 1$  と  $\theta 0$  を調整してある。この場合、フォトニック結晶 50 内を Z 方向に進行する高次伝播光が得られる。また、破線 124 で示す入射光 (設計周波数よりも周波数の小さい周波数の入射光) の場合にも、白丸で示す結合バンドの位置 127 がブリルアンゾーンの上側の境界線 125 上にあることがわかる。プリズム 122 の材質としては、屈折率が 3 以上のものが好ましく、例えばシリコン (屈折率が 3.47) などを用いることができる。

#### 【0182】

この構成例によれば、プリズム 122 の屈折率を高くして結合バンドの位置 126 をブリルアンゾーンの上側の境界線 125 上のバンドと結合させるようにしている。これにより、入射光 80 の周波数が設計周波数から離れても結合バンドの位置 (結合点) の、ブリルアンゾーンの上側の境界線 125 上からのずれを小さくすることができ、境界線での伝播が起こる周波数帯域を広く取ることができる。

(斜め端面と回折格子の組み合わせ)

入射光の方向を変える手段として、回折格子も有用である。図 76 (a) は、フォトニック結晶 50 の斜め端面 50c に近接して、斜め端面 50c と入射光 80 の間に回折格子 130 を挟んだフォトニック結晶導波路の構成例を示している。図 76 (b) は、図 76 (a) に示す構成例における、図 73 (a) と同様のバンド図である。図 76 (b) では、回折格子 130 を介してフォトニック結晶 50 の斜め端面 50c に入射する入射光 80 が設計周波数の入射光である場合におけるフォトニックバンドとの結合状態を実線 161 で示し、その入射光 80 が設計周波数よりも周波数の小さい入射光である場合における同結合状態を破線 162 で示してある。

#### 【0183】

図 76 (b) から分かるように、実線 161 で示す入射光 80 の +1 次回折光がフォトニック結晶と結合する場合に、実線 161 で示す設計周波数の入射光については、黒丸で示す結合バンドの位置 163 がブリルアンゾーンの境界線 86 上にくるように  $\Psi 1$  と  $\theta 0$  を調整してある。破線 132 で示す設計周波数よりも周波数の小さい入射光については、周波数が変わっても結合バンドの位置 164 はブリルアンゾーンの境界線 86 からほとんどずれないことがわかる。

#### 【0184】

この図 76 (a) に示す構成例によれば、境界線 86 での伝播が起こる周波数帯域を広く取ることができる。回折格子 130 は、特定の次数の回折光が強くなるように、プレーズ形状などの設計を行なうことが望ましいことはいうまでもない。

#### 【0185】

回折格子と組み合わせたフォトニック結晶導波路の構成例のいくつかを図 77 (a) ~ (h) に基づいて説明する。

・図 77 (a) は、フォトニック結晶 50 の斜め端面 50c と回折格子 130 を平行に配置したフォトニック結晶導波路の構成例を模式的に示してある。

#### 【0186】

回折格子 130 を斜め端面 50c と平行になるように保持するようにした具体的な構成例を、図 77 (b) ~ (d) に示してある。

・図 77 (b) の構成例では、一方の面に回折格子 130 を刻んだ平行平面基板 136 を、回折格子 130 が斜め端面 50c と平行に近接するように設置してある。その一方の面が斜め端面 50c と密着するように、平行平面基板 136 を設置しても良い。

#### 【0187】

・図77(c)の構成例では、平行平面基板136の、回折格子130を刻んでいない他方の面が斜め端面50cと密着するように、平行平面基板136を設置してある。回折格子130を刻んだ平行平面基板136の一方の面を斜め端面50cと密着させるようにしても良い。

【0188】

・図77(d)の構成例では、フォトニック結晶50の斜め端面50cに回折格子130を直接刻んである。

回折格子130が斜め端面50cと平行でない場合の構成例を、図77(e)～(h)に示してある。

【0189】

・図77(e)の構成例では、1つの面に回折格子130を刻んだ三角形のプリズム137を、回折格子130が斜め端面50cと非平行となるように、その1つの面側を斜め端面50cに近接させて設置してある。

【0190】

・図77(f)の構成例では、1つの面に回折格子130を刻んだ三角形のプリズム138を、その1つの面が斜め端面50cと非平行となるように、もう1つの面を斜め端面50cに密着させてある。斜め端面50cの表面にある程度の厚さをもった薄膜を形成し、その薄膜をプリズム状に加工してから表面に回折格子130を刻んでも良い。

【0191】

・図77(g)の構成例では、回折格子130を刻んだ平行平面基板136を、垂直な姿勢にして、一方の面が斜め端面50cと非平行に近接するように設置してある。この構成例は、回折格子130の回折面をZ軸に垂直にしたものであり、回折格子130の配置と調整がしやすい、という特徴がある。

【0192】

・図77(h)の構成例では、1つの面に回折格子130を刻んだ直角三角形のプリズム139を、回折格子130が斜め端面50cと非平行となるように、もう1つの面側を斜め端面50cに密着させて設置してある。斜め端面50cの表面にある程度の厚さをもった薄膜を形成し、その薄膜をプリズム状に加工してから表面に回折格子130を刻んでも良い。

【0193】

以上述べた(2a)～(2g)の方法により、1次元フォトニック結晶内に、ブリルアンゾーンの境界線上のバンドを利用する高次バンド伝播光を効率良く形成することができる。また、伝播光をフォトニック結晶の垂直な端面から均質物質中に出射させると、著しい回折が生じて取り扱いに不便である。しかし、上述した(2d)～(2g)の方法で用いた入射側の位相格子を逆向きにして出射側の端面に設置したり、あるいは出射側の端面を入射側の斜め端面とは逆向きの斜め端面にすれば、出射光を平面波に戻すことができる。これにより、光ファイバなどとの結合が容易になる。

【0194】

以下、本発明の各実施形態について説明する。

【第1実施形態】

以上説明した1次元フォトニック結晶を用いて例えば図20に示すような光学素子を設計する場合は、導波路形状とすると、光ファイバーとの接続や、上記特性(「非常に大きい波長分散」や「群速度異常」)を制御するための電極の設置などがやりやすいので望ましい。

【0195】

図20に示す光学素子は、図21に示す第1実施形態に係るフォトニック結晶導波路200を用いて構成したものである。このフォトニック結晶導波路200は、適当な基板90上に、1次元フォトニック結晶をコアとして導波路形状に形成されている。フォトニック結晶導波路200のコアを構成するフォトニック結晶には、図1に示すフォトニック結晶50と同じ符号を用いて重複した説明を省略する。

## 【0196】

図20に示す光学素子は、平面波の入射光94をロッドレンズ95などのレンズ部材により位相格子92の端面に平行光束にして入射させ、フォトニック結晶50によるコアに結合する。この光は、フォトニック結晶導波路200のフォトニック結晶50内を伝播し、位相格子93およびロッドレンズ96などのレンズ部材を介して出射光97となる。位相格子92, 93は、図10に示す上記位相格子64, 67と同様のものである。なお、以下の説明で「1次元フォトニック結晶50」は、単に「フォトニック結晶50」という。

## 【0197】

フォトニック結晶導波路200は、一方向（周期方向であるY方向）にのみ周期性を有する1次元フォトニック結晶50により構成され、その一方向に垂直な方向（本例では「Y方向に垂直なXZ平面方向」）に電磁波（伝播光52）が伝播するコア201と、クラッド層としてのクラッド202とを備えている。本例で「一方向に垂直な方向」とは、周期方向であるY方向に垂直なXZ平面と平行なあらゆる方向（XZ平面方向）をいう。

## 【0198】

コア201を構成する1次元フォトニック結晶50は、図21および図22に示すように、厚さ $t_A$ の媒体A（屈折率 $n_A$ ）と厚さ $t_B$ の媒体B（屈折率 $n_B$ ）を交互に積み重ねた周期 $a = (t_A + t_B)$ をもった周期的多層膜である。

## 【0199】

クラッド202は、コア201の周期方向（一方向）に垂直な両側表面に、フォトニック結晶50と同じ方向に周期性を有するフォトニック結晶により構成され、コア201内を伝播する電磁波が周期方向に垂直な表面（上下の表面）から外部に漏れるのを阻止する閉じ込め用クラッドである。

## 【0200】

このようなフォトニック結晶導波路200を構成するには、上下方向（Y方向）および左右方向（X方向）への、光の閉じ込めが必要となる。この第1実施形態では、フォトニック結晶50の上述したブリルアンゾーンの境界線上のフォトニックバンドを利用する伝播光について、各方向の閉じ込め条件を以下に述べる。

（Y方向のモード）

図21および図22に示すフォトニック結晶50において、規格化周波数 $a/\lambda_0$ に対応する第1バンド（YZ平面内、X座標は0）によるZ方向の伝播光について考える（図23参照）。

## 【0201】

図23に示す第1バンド上の点 $(0, k_y, k_z)$ による伝播光の波数ベクトルは、  
 $k = (0, k_y, k_z)$

である。フォトニック結晶50中に形成される波面は $k$ と垂直であり、その波長 $\lambda$ と伝播角 $\phi$ は、

$$\lambda = 2\pi / |k| = 2\pi / (k_y^2 + k_z^2)^{0.5} \dots (1式)$$

$$\tan \phi = k_y / k_z \dots (2式)$$

で表わされる。

## 【0202】

ここで、コア201となるフォトニック結晶50の周期を $a$ 、高屈折率層の数は $(m+1)$ とする（図24参照）。

コア201を伝播する波動の位相整合条件は、

$$2A|k|\sin \phi = \Phi + \pi N \quad (N=0, 1, 2, 3 \dots) \dots (3式)$$

である。ただし、 $2A$ はコア201の厚さ（コア厚さ）である。（参考：國分泰雄著「光波工学」共立出版48頁）

$\Phi$ はコア201とクラッド202の界面での位相変化量であるが、今注目すべきブリルアンゾーンの境界線上の第1バンド伝播光では、高屈折率層の中心に電場の腹がくるので、



$\Phi = 0 \cdots (4 \text{ 式})$

コア厚さ  $2A$  は、

$2A = a m \cdots (5 \text{ 式})$

と単純化することができる。

【0203】

(3式)に(1式), (2式), (4式)および(5式)を代入して整理すると、

$k_y = N\pi / ma \cdots (6 \text{ 式})$

を満たすバンド上の点が、位相整合条件を満たす伝播光、すなわちモードとなる。図25に示すように、モードは $N=0$ の0次モードから $N=m$ の $m$ 次モードまで存在し、

ブリルアンゾーンの中心線上の伝播光: 0次モード

ブリルアンゾーンの境界線上の伝播光:  $m$ 次モード

となる。もっとも、 $\psi$ が0に近い低次モードの場合は(4式)の仮定が不正確であると考えられるが、ブリルアンゾーンの境界線付近の $m$ 次に近い高次モードに関しては充分であるとする。

【0204】

規格化周波数  $a/\lambda_0$  に対応する第2バンドが存在する場合にも同様に、コア201をなす低屈折率層の数を $m+1$ とすると、 $m$ 個のモードが存在する(図26参照)。

(Y方向の閉じ込めと単一モード条件)

通常の単一モード導波路の場合は第1バンドにおける $N=0$ の0次モードのみを伝播させるが、本発明の構成ではブリルアンゾーンの境界線上の $m$ 次モードを伝播させる。伝播モードのZ方向における上述した実効屈折率が上下の媒体の屈折率よりも大きい場合は、そのまま屈折率差による閉じ込めが可能である。しかし、実効屈折率が小さければ屈折により伝播光が媒体側に漏れてしまう。特に、高次モード光のZ方向実効屈折率が1未満になると、媒体を空気としても漏れを防ぐことができなくなる。そのような場合は、図21に示す本例のように上下のクラッド202もフォトニック結晶としてPBG(フォトニックバンドギャップ: 以下、「PBG」という。)による閉じ込めを行なう。

【0205】

図27は、周期  $a$  のコア201に隣接して、コア201と同じ構成で周期  $b$  ( $a < b$ ) のクラッド202をつけた場合についてのバンド図を示したものである。クラッド202の周期がコア201よりわずかに大きいので、同じ規格化周波数に対応するクラッド202のPBGがコア201の第1バンド上のモード $N=m$ と $N=(m-1)$ にかかり、この2つのモードだけが閉じ込められていることがわかる。周期  $a$  と  $b$  の差を小さくしていくとPBGがより左に移動するので、 $m$ 次モードだけの単一モード条件にすることができる。理論的には、コア201のモード数が多くなって $m$ 次モードと $(m-1)$ 次モードがバンド図上でどんなに接近してきても、 $a$ と $b$ を近づけることによって単一モード条件とすることができる。しかし、発明者らのシミュレーションによると、 $a$ と $b$ をあまり接近させると閉じ込め作用が弱くなり、十分な閉じ込めを行うためにはクラッド202の周期数が10周期を超えて実用的ではなくなってしまう。したがって、実際の導波路を設計するにあたっては、

- ・クラッド202の周期数の実用的な上限
- ・十分な閉じ込めが可能な  $a$  と  $b$  の間隔
- ・コア201の周期数

などの条件のバランスが取れた構成とする必要がある。また、図26に示すような、第2バンドのブリルアンゾーンの境界線上にあるモードを利用する場合は、クラッド202の周期をコア201より幾分小さくしてPBGを左にずらせば良い。

【0206】

クラッド202のPBGの位置を調節して単一モード条件を実現するためには、

- ・コア201と同じ構成で周期のみ異なる多層膜をクラッド202とする方法のほかに、
- ・コア201とクラッド202の周期を同じとして、多層膜を構成する2種の媒体の膜



厚比を異なったものとする、

- ・コア 201 とは異なる媒体の組合わせのクラッド 202 とする、
- ・1 周期が 3 層以上で構成させるフォトニック結晶 50 とする、

といった方法を単独あるいは複合して用いることも、もちろん可能である。

#### 【0207】

バンド図による閉じ込めの判定は、無限周期構造を前提としたものであるから、クラッド 202 の閉じ込め用フォトニック結晶の周期数が例えば 3 周期くらいであると、閉じ込めが不充分となり伝播光が外部に漏れてしまうことがある。もちろん、不必要に周期数を多くすることはコストと多層膜の耐久性や精度の点から好ましくない。実際に必要な最低限の周期数は、実験や電磁波シミュレーションにより決定することが望ましい。

(XZ 方向のモード)

Y 方向においては、ブリルアンゾーンの境界線にある m 次モードのみが 1 次元フォトニック結晶中に存在している単一モード条件を仮定して、この伝播光の XZ 平面での閉じ込めについて考える。図 28 は、Y 方向 m 次モードのバンドを、逆空間の XZ 方向に示したものである。XZ 方向には構造がないので、フォトニックバンドは円となる。波数ベクトルは、

$$k = (k_x, \pi/a, k_z)$$

であり、図 28 の円の半径

$$(k_x^2 + k_z^2)^{0.5}$$

は、一定値である。

#### 【0208】

ここで、1 次元フォトニック結晶矩形導波路であるフォトニック結晶導波路 200 内を「Y 方向 m 次」の波動が Z 方向に進む場合を考える (図 29 参照)。フォトニック結晶導波路 200 の側面 (YZ 平面と平行) には、市松模様の電場パターンが露出しており、側面は屈折率  $n_s$  の均質媒体 (外部媒体) と接しているものとする。図 29 より、側面には

(a) 周期  $2a$

(b) 周期  $\lambda$

(c) 周期  $a\lambda / (\lambda^2/4 + a^2)^{0.5}$

に対応する波面が均質媒体側に生じて、漏れ光となる可能性がある。ところが、(a)、(b) の場合は同じ波面上に同じ強度の山と谷が交互にならんでいるため、打ち消しあって波面は消滅する。換言すると、漏れ光は生じない。従って、漏れ光が生じるのは (c) の波面が

$$\lambda_0 / n_s < a\lambda / (\lambda^2/4 + a^2)^{0.5}$$

の条件を満たす場合に限られる。

#### 【0209】

図 30 は、さらに一般的に伝播光が Z 方向に対して伝播角  $\phi$  だけ傾いて進行する場合である。この場合でも同様に、

(a) 周期  $2a$

(b) 周期  $\lambda / \cos \phi$

(c) 周期  $a(\lambda / \cos \phi) / \{(\lambda^2 / 4 \cos^2 \phi) + a^2\}^{0.5}$

に対応する波面が均質媒体側に生じて、漏れ光となる可能性があるが、漏れ光が生じるのは (c) の波面が

$$\lambda_0 / n_s < a(\lambda / \cos \phi) / \{(\lambda^2 / 4 \cos^2 \phi) + a^2\}^{0.5}$$

... (7 式)

の条件を満たす場合に限られる。

#### 【0210】

次に XZ 平面内でのモードについて考える。コア 201 の X 方向の導波路幅を  $2L$  とすると、位相整合条件は図 31 より、

$$2L(2\pi/\lambda) \sin \phi = \Phi + \pi N \quad (N=0, 1, 2, 3 \dots)$$

... (8式)

となる。位相変化量 $\Phi$ は、 $0 \sim \pi$ の間にあるので

$$\Phi = \pi s, \quad 0 \leq s \leq 1$$

とにおいて(8式)を変形すると、

$$2L = (s + N) \lambda / (2 \sin \phi)$$

となる。

#### 【0211】

閉じ込めがなされる伝播角 $\phi$ の最大値を $\phi_0$ とすると、0次および1次のモードが存在するための $2L$ の範囲は、

$$0 \text{ 次モードが存在} : 2L \geq s \lambda / 2 \sin \phi_0$$

$$1 \text{ 次モードが存在} : 2L \geq (1 + s) \lambda / 2 \sin \phi_0$$

となる。

#### 【0212】

伝播角 $\phi$ と位相変化量 $\Phi$ の関係がわかれば、上記の式における $2L$ の範囲は求めることができる。ところが、 $\phi$ と $\Phi$ の関係は単純なスラブ導波路の場合は既知であるが、本発明のようなフォトリック結晶中の伝播光については明らかになっていない。しかし、後述するシミュレーション結果において、伝播光の電場は導波路の境界面外で急速に弱くなっているため、0次、1次といった $\phi$ の比較的小さいモードにおいては $\Phi$ は $\pi$ に近い値であると考えられる。特定の $\phi_0$ に対して、0次モードのみ存在する領域、すなわち単一モード条件を満たす $2L$ の範囲(シングルモード領域)は、模式的に図32のように表わされる。図32より導波路幅 $2L$ が単一モード条件を満たすための必要条件は、

$$0 \leq 2L < \lambda / \cos \phi_0$$

であり、

$$2L = \lambda / 2 \cos \phi_0$$

が充分条件であることがわかる。

#### 【0213】

(7式)より、伝播角 $\phi$ の波動の閉じ込めについては、関数

$$f(\phi) = a(\lambda / \cos \phi) / \{ (\lambda / 2 \cos \phi)^2 + a^2 \} - 0.5 - (\lambda_0 / n s) \dots (8式)$$

により判定することができる。 $f(\phi)$ が負であれば伝播する波動はフォトリック結晶導波路200のコア201内に閉じ込められ、 $f(\phi)$ が正であればコア201の側面からの漏れ光となる。

#### 【0214】

以下の条件、

$$\lambda_0 = 1550 \text{ nm}$$

$$a / \lambda_0 = 0.28$$

$$\lambda_0 / \lambda = n_{\text{eff}} = 0.30$$

$$n s = 1.45$$

において、伝播角 $\phi$ を横軸とし、

$$f(\phi)$$

$$2L = \lambda / (2 \sin \phi)$$

$$2L = \lambda / \sin \phi$$

を縦軸にプロットしたグラフが図33である。ただし、 $f(\phi)$ は正負のみが問題なので、10倍に拡大して表記している。

#### 【0215】

図33においては、 $f(\phi)$ が常にマイナスなので、 $\phi$ の値にかかわらず伝播光はコア201の側面から外に出て行くことができず、完全な閉じ込め状態となる。この場合、閉じ込めがなされる $\phi$ の最大値 $\phi_0$ は $90^\circ$ であるので、単一モード条件を満たす $2L$ の範囲(シングルモード領域)は $\phi = 90^\circ$ の線上にある(図32参照)。また、 $2L$ が単一モード条件の範囲より大きくなると、伝播モードの数は多くなるが側面からの漏れ光は発

生しない。

【0216】

図34は、

$$\lambda_0 = 1550 \text{ nm}$$

$$a/\lambda_0 = 0.50$$

$$\lambda_0/\lambda = n_{\text{eff}} = 1.1$$

$$n_s = 1.45$$

の場合である。図34においては、 $\phi$ が $17.3^\circ$ 以上になるとコア201の側面からの漏れ光が発生する。従って、単一モード条件を満たす領域（シングルモード領域）は、 $\phi_0 = 17.3^\circ$ の場合での範囲となる。なお、単一モード条件の限界となる $\phi_0$ の値は、 $n_s$ の値を動かすことによって調整することができる。

【0217】

図35は、

$$\lambda_0 = 1550 \text{ nm}$$

$$a/\lambda_0 = 0.70$$

$$\lambda_0/\lambda = n_{\text{eff}} = 1.40$$

$$n_s = 1.60$$

の場合である。図35においては、 $f(\phi)$ の値が常にプラスの値なので、 $2L$ の値にかかわらず0次を含むすべてのモードが漏れ光となり、長距離を伝播させることができない。

【0218】

以上のように構成された第1実施形態によれば、以下の作用効果を奏する。

以上の結果をまとめると、フォトニック結晶導波路200は、XZ方向の閉じ込めの強さによって以下のような種類の導波路を作ることができる。

【0219】

(1) 「完全閉じ込め単一モード導波路」

以下の必要条件を満たすことで、フォトニック結晶導波路200を「完全閉じ込め単一モード導波路」とすることができる。

(必要条件)

○完全閉じ込め条件

$$f(90^\circ) = 2a - (\lambda_0/n_s) < 0$$

を満たす。

【0220】

○導波路幅 $2L$ は、伝播角 $\phi$ が $\phi = 90^\circ$ の場合において位相整合条件(7式)における0次モード( $N=0$ )のみ存在する範囲

$$s\lambda/2 \leq 2L < (s+1)\lambda/2$$

にある。ただし、コア201内を伝播する波動が、コア201の側面で閉じ込めがなされる伝播角 $\phi$ の最大値である $\phi_0$ が $\phi_0 = 90^\circ$ をもってその側面で反射する場合の位相変化量は $s\pi$ であり、 $0 \leq s \leq 1$ の範囲である。

【0221】

このような「完全閉じ込め単一モード導波路」では、次のような作用効果が得られる。

・単一モード伝播のまま急激曲げが可能で、導波路幅も細いので、素子を極めて小型にまとめることができる。

【0222】

・完全な閉じ込めとなるのは、 $a/\lambda_0$ が0.5未満という小さい値に対応し、 $n_{\text{eff}}$ が比較的小さく、分散や群速度異常の大きい領域となる。従って、分散や群速度異常といった特性が大きいことが望ましい、機能性導波路に適している。群速度が遅い（分散が大きい）領域であれば、非線形作用が増強されるので、非線形作用を利用する光学素子の特性を大きくする、あるいは光路長を短縮することができる。

【0223】

## (2) 「完全閉じ込め多モード導波路」

以下の必要条件を満たすことで、フォトニック結晶導波路 200 を「完全閉じ込め多モード導波路」とすることができる。

(必要条件)

○完全閉じ込め条件

$$f(90^\circ) = 2a - (\lambda_0 / n_s) < 0$$

を満たす。

## 【0224】

○導波路幅  $2L$  は、伝播角  $\phi$  が  $\phi = 90^\circ$  の場合において位相整合条件 (7 式) における 1 次以上のモードが存在する範囲

$$(s+1)\lambda/2 \leq 2L$$

にある。ただし、コア 201 内を伝播する波動が、前記伝播角の最大値  $\phi_0 = 90^\circ$  をもってその側面で反射する場合の位相変化量は  $s\pi$  であり、 $0 \leq s \leq 1$  の範囲である。

## 【0225】

このような「完全閉じ込め多モード導波路」では、次のような作用効果が得られる。

- ・伝播角  $\phi$  によらず光がコア 201 内に閉じ込められるので、共振器などに適する。
- ・導波路幅は一定である必要も無く、上限も無いので、自由な形状の共振器とすることができる。

## 【0226】

・群速度が遅い (分散が大きい) 領域であれば、非線形作用が増強されるので、非線形作用を利用する光素子の特性を大きくすることができる。共振器と組み合わせてレーザー発振などを行うこともできる。

## 【0227】

## (3) 「不完全閉じ込め単一モード導波路」

以下の必要条件を満たすことで、フォトニック結晶導波路 200 を「不完全閉じ込め単一モード導波路」とすることができる。

(必要条件)

$$\begin{aligned} \circ f(\phi) = a(\lambda / \cos \phi) / \{ (\lambda / 2 \cos \phi)^2 + a^2 \} > 0.5 \\ - (\lambda_0 / n_s) = 0 \end{aligned}$$

を満たす前記伝播角の最大値  $\phi_0$  ( $0 < \phi_0 < 90^\circ$ ) が存在する。

## 【0228】

○導波路幅  $2L$  は、伝播角  $\phi$  が  $\phi = \phi_0$  ( $0 < \phi_0 < 90^\circ$ ) の場合において位相整合条件 (7 式) おける 0 次モード ( $N=0$ ) のみ存在する範囲

$$s\lambda/2 \cos \phi_0 \leq 2L < (s+1)\lambda/2 \cos \phi_0$$

にある。ただし、コア 201 内を伝播する波動が伝播角の最大値  $\phi_0$  ( $0 < \phi_0 < 90^\circ$ ) をもってコア 201 の側面で反射する場合の位相変化量は  $s\pi$  であり、 $0 \leq s \leq 1$  の範囲である。

## 【0229】

このような「不完全閉じ込め単一モード導波路」では、次のような作用効果が得られる。

- ・伝播角  $\phi$  によっては漏れ光の発生する条件であるが、導波路幅  $2L$  を充分小さくしているので単一モード条件となる。

## 【0230】

・伝播角  $\phi$  が伝播角の最大値  $\phi_0$  ( $0 < \phi_0 < 90^\circ$ ) を超えると漏れ光が生じるので、急激曲げはできない。導波路構造の設計にあたっては、最小曲げ半径を電磁波シミュレーションなどによって調べておくことが望ましい。

## 【0231】

・不完全な閉じ込めとなるのは、 $a/\lambda_0$  が完全閉じ込め条件よりも大きい値に対応し、 $neff$  が比較的大きく、分散や群速度異常の小さい領域となる。従って、分散や群速度異常といった特性が小さいことが望ましい、単純な導波路に適している。

## 【0232】

## (4) 「不完全閉じ込め多モード導波路」

以下の必要条件を満たすことで、フォトニック結晶導波路200を「不完全閉じ込め多モード導波路」とすることができる。

(必要条件)

$$0 < f(\phi) = a(\lambda / \cos \phi) / \{ (\lambda / 2 \cos \phi)^2 + a^2 \} < 0.5$$

$$- (\lambda_0 / n_s)$$

を満たす  $\phi_0$  ( $0 < \phi_0 < 90^\circ$ ) が存在する。

## 【0233】

○導波路幅  $2L$  は、伝播角  $\phi$  が  $\phi = \phi_0$  ( $0 < \phi_0 < 90^\circ$ ) の場合において位相整合条件(7式)における1次以上のモードが存在する範囲

$$(s+1) \lambda / 2 \cos \phi_0 \leq 2L$$

にある。ただし、コア201内を伝播する波動が伝播角の最大値  $\phi_0$  ( $0 < \phi_0 < 90^\circ$ ) をもってコア201の側面で反射する場合の位相変化量は  $s\pi$  であり、 $0 \leq s \leq 1$  の範囲である。

## 【0234】

このような「不完全閉じ込め多導波路」では、次のような作用効果が得られる。

・伝播角  $\phi$  が  $\phi_0$  ( $0 < \phi_0 < 90^\circ$ ) 以下であれば閉じ込めがなされているが、導波路幅  $2L$  が大きいので複数のモードが伝播する可能性がある。

## 【0235】

・伝播角  $\phi$  が  $\phi_0$  ( $0 < \phi_0 < 90^\circ$ ) を超えると漏れ光が生じるので、急激曲げはできない。導波路構造の設計にあたっては、最小曲げ半径を電磁波シミュレーションなどによって調べておくことが望ましい。

## 【0236】

・単一モード伝播にはならないが、導波路幅が広いので外部平面波との結合が容易になる。単一モード伝播が特に必要ではない、例えばデテクタに光を導く導波路などに利用することができる。

## [第2実施形態]

次に、上記第1実施形態で説明した図21および図22に示すフォトニック結晶導波路200についての、ブリルアンゾーン中央のバンドを利用する伝播光について、各方向の閉じ込め条件についても以下に述べる。

(Y方向のモード)

上述した「ブリルアンゾーンの境界線上のバンド」を用いる伝播と異なり、伝播モードは、図26に示す第2バンドの、 $N=0$ の0次モードである。図25に示す「第1バンドの0次モード」は、その特性が通常の平面波に近いので、用いない。

(Y方向の単一モード条件)

伝播モードの上記実効屈折率が、上下のクラッド媒体の屈折率よりも大きい場合は、そのまま屈折率差による閉じ込めが可能であるが、実効屈折率が小さければ、図21に示すフォトニック結晶導波路200のようにクラッド202もフォトニック結晶としてPBGによる閉じ込めを行なう必要がある(図36参照)。具体的な条件については、「ブリルアンゾーンの境界線上の伝播」の場合と同様である。なお、第2バンドと第3バンドは図36に示すような関係にあるが、フォトニック結晶50の構成によっては第2バンドと第3バンドが重なり、PBGが存在しない場合もある。

(XZ方向のモード)

図37に示す様に、フォトニック結晶導波路200のコア201の側面(YZ平面と平行)には、ブリルアンゾーンの境界線上での伝播と同様に市松模様の電場パターンが露出しているが、Y方向の周期は  $a$  であり、高屈折率層の電場と低屈折率層の電場は強さが異なり、非対称な関係にある。側面は屈折率  $n_s$  の均質媒体と接していて、伝播光がZ方向に対して伝播角  $\phi$  だけ傾いている場合は、

(a) 周期  $a$

(b) 周期  $\lambda / \cos \phi$

(c) 周期  $a (\lambda / \cos \phi) / \{ (\lambda / \cos \phi)^2 + a^2 \}^{0.5}$

に対応する波面が均質媒体側に生じて、漏れ光となる可能性がある。(a)は互いに打ち消されるが、(b)は非対称性によって波面が発生する。従って、漏れ光が生じる可能性があるのは(b)と(c)であり、

$$\lambda_0 / n_s < \lambda / \cos \phi$$

$$\lambda_0 / n_s < a (\lambda / \cos \phi) / \{ (\lambda / \cos \phi)^2 + a^2 \}^{0.5}$$

のいずれかの条件が満たされれば漏れ光が生じる。ただし、後者の式が成り立つ場合は前者も必ず成り立つので、実際には前者の式のみで漏れ光の発生は判定できる。

#### 【0237】

伝播角  $\phi$  の波動の閉じ込めについては、関数

$$g(\phi) = \lambda / \cos \phi - (\lambda_0 / n_s)$$

により判定することができる。 $g(\phi)$ の両方が負であれば波動はフォトニック結晶導波路200のコア201内に閉じ込められ、少なくとも片方が正であればコア201の側面から漏れ光となる。ここで、関数 $g(\phi)$ は、伝播角 $\phi$ が $90^\circ$ に近づくと必ずプラスになる( $+\infty$ に発散する)ので、 $\phi$ によらない完全閉じ込めは不可能であることがわかる。

#### 【0238】

また、XZ平面内でのモードは、「ブリルアンゾーンの境界線上の伝播」の場合と同様に定義できる。

図38は、

$$\lambda_0 = 1550 \text{ nm}$$

$$a / \lambda_0 = 0.90$$

$$\lambda_0 / \lambda = n_{\text{eff}} = 1.2$$

$$n_s = 1.00$$

の場合である。図38においては、伝播角 $\phi$ が $34^\circ$ 以上になるとコア201の側面からの漏れ光が発生する。従って、単一モード条件を満たす領域(シングルモード領域)は、伝播角 $\phi$ が $34^\circ$ 以下の範囲となる。なお、単一モード条件の限界となる伝播角 $\phi$ の値は、 $n_s$ の値を動かすことによって調整することができる。

#### 【0239】

図39は、

$$\lambda_0 = 1550 \text{ nm}$$

$$a / \lambda_0 = 0.80$$

$$\lambda_0 / \lambda = n_{\text{eff}} = 0.80$$

$$n_s = 1.45$$

の場合である。図39においては、 $g(\phi)$ が常にプラスの値なので、2Lの値にかかわらず0次を含むすべてのモードが漏れ光となり、長距離を伝播させることができない。

#### 【0240】

以上のように構成された第2実施形態によれば、以下の作用効果を奏する。

以上の結果をまとめると、フォトニック結晶導波路200は、XZ方向の閉じ込めの強さによって以下のような種類の導波路を作ることができる。

#### 【0241】

(1) 「不完全閉じ込め単一モード導波路」

以下の必要条件を満たすことで、フォトニック結晶導波路200を「不完全閉じ込め単一モード導波路」とすることができる。

(必要条件)

○数式

$$g(\phi) = \lambda / \cos \phi - (\lambda_0 / n_s) = 0$$

となる伝播角の最大値 $\phi_0$  ( $0 < \phi_0 < 90^\circ$ ) が存在する。

#### 【0242】

○導波路幅2Lは、伝播角 $\phi$ が $\phi = \phi_0$  ( $0 < \phi_0 < 90^\circ$ ) の場合において位相整

合条件 (7式) における 0 次モード ( $N=0$ ) のみ存在する範囲

$$s\lambda/2\cos\phi_0 \leq 2L < (s+1)/2\cos\phi_0$$

にある。ただし、コア 201 内を伝播する波動が伝播角の最大値  $\phi_0$  ( $0 < \phi_0 < 90^\circ$ ) をもってコア 201 の側面で反射する場合の位相変化量は  $s\pi$  であり、 $0 \leq s \leq 1$  の範囲である。

#### 【0243】

このような「不完全閉じ込め単一モード導波路」では、次のような作用効果が得られる。

- ・伝播角  $\phi$  によっては漏れ光の発生する条件であるが、導波路幅  $2L$  を充分小さくしているので単一モード条件となる。

#### 【0244】

- ・伝播角  $\phi$  が伝播角の最大値  $\phi_0$  ( $0 < \phi_0 < 90^\circ$ ) を超えると漏れ光が生じるので、急激曲げはできない。導波路構造の設計にあたっては、最小曲げ半径を電磁波シミュレーションなどによって調べておくことが望ましい。

#### 【0245】

- ・ $a/\lambda_0$  を小さくすると、分散や群速度異常の大きい領域となる。従って、機能素子に適している。

#### (2) 「不完全閉じ込め多モード導波路」

以下の必要条件を満たすことで、フォトニック結晶導波路 200 を「不完全閉じ込め多モード導波路」とすることができる。

(必要条件)

○数式

$$g(\phi) = \lambda/\cos\phi - (\lambda_0/n_s) = 0$$

となる伝播角の最大値  $\phi_0$  ( $0 < \phi_0 < 90^\circ$ ) が存在する。

#### 【0246】

○導波路幅  $2L$  は、伝播角  $\phi$  が  $\phi = \phi_0$  ( $0 < \phi_0 < 90^\circ$ ) の場合において位相整合条件 (7式) における 1 次以上のモードが存在する範囲

$$(s+1)\lambda/2\cos\phi_0 \leq 2L$$

にある。ただし、伝播する波動が伝播角の最大値  $\phi_0$  ( $0 < \phi_0 < 90^\circ$ ) をもって側面で反射する場合の位相変化量は  $s\pi$  であり、 $0 \leq s \leq 1$  の範囲である。

#### 【0247】

このような「不完全閉じ込め多モード導波路」では、次のような作用効果が得られる。

- ・導波路幅  $2L$  は、1 次以上のモードが存在する大きさである。
- ・伝播角  $\phi$  が  $\phi_0$  ( $0 < \phi_0 < 90^\circ$ ) を超えると漏れ光が生じるので、急激曲げはできない。導波路構造の設計にあたっては、最小曲げ半径を電磁波シミュレーションなどによって調べておくことが望ましい。

#### 【0248】

- ・単一モード伝播にはならないが、導波路幅が広いので外部平面波との結合が容易になる。単一モード伝播が特に必要ではない、例えばダイテクタに光を導く導波路などに利用することができる。

#### 【0249】

#### [第3実施形態]

次に、本発明を、コア部分を均質物質とした導波路に適用した第3実施形を説明する。本実施形態に係る均質媒体導波路 300 は、図 40 に示すように、一方向 (Y 方向) に有限な厚さを有する屈折率  $n_0$  の均質物質により構成され、前記一方向に垂直な方向 (XZ 平面方向) に電磁波が伝播するコア 301 と、クラッド 312 とを備えている。

#### 【0250】

クラッド 312 は、コア 301 の Y 方向 (一方向) に垂直な両側表面に、Y 方向に周期性を有する 1 次元フォトニック結晶により構成され、コア 301 内を伝播する電磁波が Y 方向に垂直な表面 (上下の表面) から外部に漏れるのを阻止する閉じ込め用クラッドであ



る。

#### 【0251】

このような均質媒体導波路300を構成する場合にも、上下方向(Y方向)および左右方向(X方向)への、光の閉じ込めが必要となる。

以下、均質媒体導波路300についての、Y方向の高次モードを利用する伝播光について、各方向の閉じ込め条件を以下に述べる。

#### 【0252】

屈折率 $n_0$ の均質物質により構成されたコア301のY方向の厚さは $2B$ であり、前記両側表面にクラッド312が設けられている。コア301中の波面の伝播角を $\psi$ とする(図40参照)。コア301を伝播する波動の位相整合条件は、

$$2B(2\pi n_0/\lambda_0) \sin \psi = \Phi + \pi N \quad (N=0, 1, 2, 3 \dots)$$

である。位相変化量 $\Phi$ は、 $0 \sim \pi$ の間にあるので

$$\Phi = \pi s, \quad 0 \leq s \leq 1$$

とおくと、モードの伝播角 $\psi$ は

$$\sin \psi = \lambda_0 (s + N) / 4Bn_0$$

となり、コアのバンド図(単純な円となる)におけるモードは図41の様に分布する。図41はモードが4個存在する場合である。コアの厚さ $2B$ が厚くなるとモード数が増加する。

#### 【0253】

クラッド312を $n_0$ より屈折率の低い均質物質とすると、低次側のモードしか閉じ込めることができない。しかし、上述した1次元フォトニック結晶によりクラッド312を構成し、そのフォトニックバンドギャップを閉じ込めに用いると、図41に示すように特定の高次モードのみ閉じ込めることが可能となる。

(XZ方向のモード)

Y方向においては、ブリルアンゾーンの境界線上にある単一の高次モード(Y方向モードの伝播角 $\psi$ 、XZ平面内の波長 $\lambda = \lambda_0 / n_0 \cos \psi$ )のみがコア301中に存在している単一モード条件を仮定して、コア301内での伝播光のXZ平面での閉じ込めについて考える。コア301内をZ方向に進行する高次モード伝播光をY方向と平行な断面で見ると、市松模様の電場パターンが露出していることは、上記第1および第2実施形態のフォトニック結晶によるコアの場合と同様である(図42参照)。高次モード伝播光が導波路の長さ方向に対して伝播角 $\phi$ だけ傾いて進行する場合、

$$(a) \text{ 周期 } \lambda_0 / (n_0 \sin \psi)$$

$$(b) \text{ 周期 } \lambda_0 / (n_0 \cos \psi \cos \phi)$$

$$(c) \text{ 周期 } \lambda_0 / \{n_0 (\sin^2 \psi + \cos^2 \psi \cos^2 \phi)\} \cdot 0.5$$

に対応する波面が均質媒体側に生じて、漏れ光となる可能性がある。しかし、漏れ光が生じるのは(c)の波面が、次の数式

$$\lambda_0 / ns < \lambda_0 / \{n_0 (\sin^2 \psi + \cos^2 \psi \cos^2 \phi)\} \cdot 0.5$$

を変形した、

$$ns > n_0 (\sin^2 \psi + \cos^2 \psi \cos^2 \phi) \cdot 0.5 \dots (9\text{式})$$

の条件を満たす場合に限られる。

#### 【0254】

次に、XZ平面内でのモードについて考える。図40に示すコア301のX方向の導波路幅を $2L$ とすると、位相整合条件は、

$$2L(2\pi/\lambda) \sin \phi = \Phi + \pi N \quad (N=0, 1, 2, 3 \dots)$$

となる(図31参照)。

#### 【0255】

位相変化量 $\Phi$ は、 $0 \sim \pi$ の間にあるので

$$\Phi = \pi s, \quad 0 \leq s \leq 1$$

とおいて式を変形すると、

$$2L = (s + N) \lambda / (2 \sin \phi)$$

となる。

#### 【0256】

上述したように、特定の  $\phi_0$  に対して、0 次モードのみ存在する領域、すなわち単一モード条件を満たす  $2L$  の範囲は、模式的に図 32 のように表われる。図 32 より導波路幅  $2L$  が単一モード条件を満たすための必要条件は、

$$0 < 2L < \lambda / \sin \phi$$

であり、

$$2L = \lambda / 2 \sin \phi$$

が充分条件であることがわかる。

#### 【0257】

(9 式) より、伝播角  $\phi$  に基づく波動の閉じ込めについては、関数

$$h(\phi) = n_s - n_0 (\sin^2 \phi + \cos^2 \phi \cos^2 \phi) \quad (0.5)$$

により判定することができる。 $h(\phi)$  が負であればコア 301 内を伝播する波動はコア 301 内に閉じ込められ、 $h(\phi)$  が正であればその波動はコア 301 の側面からの漏れ光となる。

#### 【0258】

以下の条件、

$$\lambda_0 = 1550 \text{ nm}$$

$$\phi = 56^\circ$$

$$n_s = 1.45$$

$$n_0 = 1.00$$

において、伝播角  $\phi$  を横軸とし、

$$h(\phi)$$

$$2L = \lambda / (2 \sin \phi)$$

$$2L = \lambda / \sin \phi$$

を縦軸にプロットしたグラフが図 43 である。ただし、 $h(\phi)$  は正負のみが問題なので、1000 倍に拡大して表記している。

#### 【0259】

図 43 においては、 $h(\phi)$  が常にマイナスなので、 $\phi$  の値にかかわらず伝播光は側面から外に出て行くことができず、完全な閉じ込め状態となる。この場合、閉じ込めがなされる  $\phi$  の最大値  $\phi_0$  は  $90^\circ$  であるので、単一モード条件を満たす  $2L$  の範囲 (シングルモード領域) は  $\phi = 90^\circ$  の線上にある (図 43 参照)。また、 $2L$  が単一モード条件の範囲より大きくなると、伝播モードの数は多くなるが側面からの漏れ光は発生しない。

#### 【0260】

図 44 は、

$$\lambda_0 = 1550 \text{ nm}$$

$$\phi = 50^\circ$$

$$n_s = 1.55$$

$$n_0 = 1.45$$

の場合である。図 44 においては、伝播角  $\phi$  が  $33.4^\circ$  以上になると側面からの漏れ光が発生する。従って、単一モード条件を満たす領域 (シングルモード領域) は、伝播角の最大値  $\phi_0$  が  $\phi_0 = 33.4^\circ$  に対応する範囲となる。なお、単一モード条件の限界となる伝播角の最大値  $\phi_0$  の値は、 $n_s$  の値を動かすことによって調整することができる。

#### 【0261】

また、 $n_s > n_0$  であれば、伝播角の最大値  $\phi_0$  の値は必ず存在する。 $n_s < n_0$  にすると、伝播角  $\phi$  が常にプラスの値なので、 $2L$  の値にかかわらず 0 次を含むすべてのモードが漏れ光となり、長距離を伝播させることができない。

#### 【0262】

図 45 は、

$$\lambda_0 = 1550 \text{ nm}$$

$$\phi = 50^\circ$$

$$n_s = 1.00$$

$$n_0 = 1.45$$

の場合である。図 45 においては、 $h(\phi)$  が常にマイナスなので、 $\phi$  の値にかかわらず伝播光は側面から外に出て行くことができず、完全な閉じ込め状態となる。この場合、伝播角の最大値  $\phi_0$  は ( $\phi_0 = 90^\circ$ ) であるので、単一モード条件を満たす  $2L$  の範囲は  $\phi = 90^\circ$  の線上にある (図 43 参照)。また、 $2L$  が単一モード条件の範囲より大きくなると、伝播モードの数は多くなるが側面からの漏れ光は発生しない。

#### 【0263】

以上のように構成された第 3 実施形態によれば、以下の作用効果を奏する。

以上の結果をまとめると、図 40 に示す均質媒体導波路 300 は、XZ 方向の閉じ込めの強さによって以下のような種類の導波路を作ることができる。

#### 【0264】

##### (1) 「完全閉じ込め単一モード導波路」

以下の必要条件を満たすことで、フォトニック結晶導波路 200 を「完全閉じ込め単一モード導波路」とすることができる。

(必要条件)

○完全閉じ込め条件

$$h(90^\circ) = n_s - n_0 \sin \phi < 0$$

を満たす。

#### 【0265】

○導波路幅  $2L$  は伝播角  $\phi$  が  $\phi = 90^\circ$  の場合において位相整合条件 (7 式) における 0 次モード ( $N=0$ ) のみ存在する範囲

$$s\lambda/2 \leq 2L < (s+1)\lambda/2$$

にある。ただし、コア 301 内を伝播する波動が伝播角の最大値  $\phi_0$  ( $\phi_0 = 90^\circ$ ) をもってコア 301 の側面で反射する場合の位相変化量は  $s\pi$  であり、 $0 \leq s \leq 1$  の範囲である。

#### 【0266】

このような「完全閉じ込め単一モード導波路」では、次のような作用効果が得られる。

・単一モード伝播のまま急激曲げが可能。導波路幅も細いので、素子を極めて小型にまとめることができる。

#### 【0267】

##### (2) 「完全閉じ込め多モード導波路」

(必要条件)

○完全閉じ込め条件

$$h(90^\circ) = n_s - n_0 \sin \phi < 0$$

を満たす。

#### 【0268】

○導波路幅  $2L$  は伝播角  $\phi$  は  $\phi = 90^\circ$  の場合において位相整合条件 (7 式) における 1 次以上のモードが存在する範囲

$$s\lambda/2 \leq 2L$$

にある。ただし、コア 301 内を伝播する波動が伝播角の最大値  $\phi_0$  ( $\phi_0 = 90^\circ$ ) をもってコア 301 の側面で反射する場合の位相変化量は  $s\pi$  であり、 $0 \leq s \leq 1$  の範囲である。

#### 【0269】

このような「完全閉じ込め多モード導波路」では、次のような作用効果が得られる。

・伝播角  $\phi$  によらず光が閉じ込められるので、共振器などに適する。導波路幅は一定である必要も無く、上限も無いので、自由な形状の共振器とすることができる。

#### 【0270】

##### (3) 「不完全閉じ込め単一モード導波路」

(必要条件)

$\circ h(\phi) = ns - n_0 \{ \sin^2 \phi + \cos^2 \phi \cos^2 \phi_0 \} > 0.5$   
を満たす伝播角の最大値  $\phi_0$  ( $0 < \phi_0 < 90^\circ$ ) が存在する。

【0271】

・導波路幅  $2L$  は、伝播角  $\phi$  が  $\phi = \phi_0$  ( $0 < \phi_0 < 90^\circ$ ) の場合において位相整合条件 (7式) における 0 次モード ( $N=0$ ) のみ存在する範囲

$$s\lambda / 2 \cos \phi_0 \leq 2L < (s+1)\lambda / 2 \cos \phi_0$$

にある。ただし、コア 301 内を伝播する波動が伝播角の最大値  $\phi_0$  ( $0 < \phi_0 < 90^\circ$ ) をもってコア 301 の側面で反射する場合の位相変化量は  $s\pi$  であり、 $0 \leq s \leq 1$  の範囲である。

【0272】

このような「不完全閉じ込め単一モード導波路」では、次のような作用効果が得られる。

・伝播角  $\phi$  によっては漏れ光の発生する条件であるが、導波路幅  $2L$  を充分小さくしているので単一モード条件となる。

【0273】

・伝播角  $\phi$  が  $\phi_0$  ( $0 < \phi_0 < 90^\circ$ ) を超えると漏れ光が生じるので、急激曲げはできない。導波路構造の設計にあたっては、最小曲げ半径を電磁波シミュレーションなどによって調べておくことが望ましい。

【0274】

(4) 「不完全閉じ込め多モード導波路」

(必要条件)

$\circ h(\phi) = ns - n_0 \{ \sin^2 \phi + \cos^2 \phi \cos^2 \phi_0 \} > 0.5$   
を満たす伝播角の最大値  $\phi_0$  ( $0 < \phi_0 < 90^\circ$ ) が存在する。

【0275】

○導波路幅  $2L$  は、伝播角  $\phi$  が  $\phi = \phi_0$  ( $0 < \phi_0 < 90^\circ$ ) の場合において位相整合条件 (7式) における 1 次以上のモードが存在する範囲

$$(s+1)\lambda / 2 \cos \phi_0 \leq 2L$$

にある。ただし、コア 301 内を伝播する波動が伝播角の最大値  $\phi_0$  ( $0 < \phi_0 < 90^\circ$ ) をもってコア 301 の側面で反射する場合の位相変化量は  $s\pi$  であり、 $0 \leq s \leq 1$  の範囲である。

【0276】

このような「不完全閉じ込め多モード導波路」では、次のような作用効果が得られる。

・伝播角  $\phi$  が  $\phi_0$  ( $0 < \phi_0 < 90^\circ$ ) 以下であれば閉じ込めがなされているが、導波路幅  $2L$  が大きいので複数のモードが伝播する可能性がある。

【0277】

・伝播角  $\phi$  が  $\phi_0$  ( $0 < \phi_0 < 90^\circ$ ) を超えると漏れ光が生じるので、急激曲げはできない。導波路構造の設計にあたっては、最小曲げ半径を電磁波シミュレーションなどによって調べておくことが望ましい。

【0278】

・単一モード伝播にはならないが、導波路幅が広いので外部平面波との結合が容易になる。単一モード伝播が特に必要ではない、例えばダイテクタに光を導く導波路などに利用することができる。

【0279】

[第 4 実施形態]

図 46 は第 4 実施形態に係るフォトニック結晶導波路 200A を示している。

このフォトニック結晶導波路 200A は、一方向 (周期方向である Y 方向) にのみ周期性を有する 1 次元フォトニック結晶 50 により構成され、その一方向に垂直な方向 (XZ 平面方向) に電磁波 (伝播光 52) が伝播するコア 201A と、クラッド 202A とを備えている。

## 【0280】

コア201Aは、図21に示すフォトニック結晶導波路200のコア201と同じ構成である。クラッド202Aは、コア201Aの周期方向（一方向）に垂直な両側表面に形成された金属膜などの反射層であり、コア201内を伝播する電磁波が周期方向にその両側表面（上下の表面）から外部に漏れるのを阻止する閉じ込め用クラッドである。

## 【0281】

このような構成のフォトニック結晶導波路200Aについても、上記第1実施形態で説明した「完全閉じ込め多モード導波路」、および「不完全閉じ込め多モード導波路」や、上記第2実施形態で説明した「不完全閉じ込め多モード導波路」を実現することができる。ただし、金属膜などは反射率が低いので、あまり長距離の導波路とするのは困難となる。

## 【0282】

## [第5実施形態]

次に、第5実施形態に係るフォトニック結晶導波路200Bについて説明する。このフォトニック結晶導波路200Bは、図47および図48に示すように、図21に示すフォトニック結晶50と同様の1次元フォトニック結晶（周期的多層膜）により構成され、基板220上に直角に折り曲げられた導波路構造のコア230を備える。コア230の入射端面230aには、図15に示す位相格子70と同様の位相格子240が配置されている。

## 【0283】

このような構成のフォトニック結晶導波路200Bについて、入射端面230aに平面波を垂直入射させた場合について、以下の条件での電磁波シミュレーション（FDTD、時間領域有限差分法による）を実施した。コア230を構成するフォトニック結晶の多層膜積層方向（Y方向）の境界条件は周期境界とし、周期的多層膜構造の4周期分だけを取り出して計算を行った。

## (1) 周期的多層膜の構造

つぎの媒体AとBを交互に2周期重ねたものである。

## 【0284】

（媒体A） 厚さ  $t_A = 0.30a$ 、屈折率  $n_A = 2.1011$

（媒体B） 厚さ  $t_B = 0.70a$ 、屈折率  $n_B = 1.4578$

計算上、周期  $a = 430\text{ nm}$  に設定した。

## (2) コア（導波路）230の構造

コア230は、入射端面230aからZ方向への長さが  $2\text{ }\mu\text{m}$  の直線導波路部231と、内側の側壁が直角に、外側の側壁が  $45^\circ$  折り曲げられた二等辺三角形形状の直角曲げ部232と、X方向への長さが  $30\text{ }\mu\text{m}$  の直線導波路部233とからなる構造とした。XZ平面方向において、コア230の外側は屈折率1の均質媒体であり、コア230の直線導波路部231、233の横幅はそれぞれ  $3\text{ }\mu\text{m}$  である。

## (3) 入射光

（真空中の波長）  $\lambda_0 = 1540\text{ nm}$  ( $a/\lambda_0 = 0.2792$ )

（偏光） TE偏光（入射光の電場の向きがX方向）

## (4) 入射端面230aと位相格子240の構造

図49は、位相格子240とコア230の直線導波路部231の配置を示している。入射光は、屈折率3.48の自由空間（媒体C）から直線導波路部231に入射させ、境界部分では媒体Cに矩形の周期的な溝241を形成し、この溝241に媒体Dを充填して位相格子240が形成されている。位相格子240の形状は、 $\pm 1$ 次回折光が強くなるように最適化したものである。位相格子240は、その凸部である媒体C層の中心がコア230（周期的多層膜）の高屈折率層（Ta2O5）の中心と一致するようにコア230に接して配置されている。

## 【0285】

（媒体C） 屈折率  $n_C = 3.48$

(媒体D) 屈折率  $n_D = 1.50$

(位相格子240のY方向周期)  $2a = 860 \text{ nm}$

シミュレーション結果として、コア230の高屈折率層の中心における電場の強度分布を図50に示す。伝播光はブリルアンゾーンの境界線上の第1バンドによるモードであり、伝播方向の波長 $\lambda$ は4400 nmである。

【0286】

本計算例の諸条件、

$$a = 430 \text{ nm}$$

$$\lambda_0 = 1540 \text{ nm}$$

$$\lambda = 4400 \text{ nm}$$

$$n_s = 1.00$$

$$n_{eff} = \lambda / \lambda_0 = 0.348$$

より、

$$f(\phi) = a(\lambda / \cos \phi) / \{ (\lambda / 2 \cos \phi)^2 + a^2 \}^{0.5} - (\lambda_0 / n_s)$$

は $\phi$ の値にかかわらず負となるので、完全閉じ込め条件を満足している。従って、シミュレーション結果においても直角曲げによる漏れ光はほとんど発生していない。

【0287】

また、コア230の曲がり部分で波面の方向の傾きが発生しているが、その後の伝播で波面は伝播方向と垂直にもどってきている。このことから、このフォトニック結晶導波路200Bは単一モード条件を満たしているものと考えられる。

【0288】

単一モード条件の範囲は、

$$\text{必要条件: } 0 \leq 2L \leq 4400 \text{ nm} \quad (4400 \text{ nm} = \lambda)$$

$$\text{十分条件: } 2L = 2200 \text{ nm} \quad (2200 \text{ nm} = \lambda / 2)$$

であり、空気層への電場の染み出しがほとんどないことから境界面反射での位相変化量 $\Phi$ は $\pi$ に近い値である。従って、導波路幅 $2L = 3 \mu\text{m}$ は単一モード条件を満たし得る値である。

【0289】

以上のように構成された第5実施形態によれば、以下の作用効果を奏する。

・フォトニック結晶導波路200Bは、単一モード伝播のまま急激曲げが可能であり、導波路幅も細いので、素子を極めて小型にまとめることができる。また、 $n_{eff}$ が0.348と小さく、分散や群速度異常の大きい領域となっているので、機能性導波路にも適している。

【0290】

[第6実施形態]

図51は第6実施形態に係るフォトニック結晶導波路200Cを示している。

このフォトニック結晶導波路200Cは、図47のフォトニック結晶導波路200Bの導波路幅( $3 \mu\text{m}$ )を $5 \mu\text{m}$ にしたもので、その他の部分はフォトニック結晶導波路200Bと同じであるので、コア230'以外はこれと同じ符号を付してある。

【0291】

本実施形態のフォトニック結晶導波路200Cでも、完全閉じ込め条件はフォトニック結晶導波路200Bと同じなので、満足されている。しかし、導波路幅 $2L = 5 \mu\text{m}$ は、フォトニック結晶導波路200Bで示した単一モード伝播の必要条件

$$0 \leq 2L \leq 4400 \text{ nm} \quad (4400 \text{ nm} = \lambda)$$

を満たしていないので、多モードとなり得る。

【0292】

シミュレーション結果として、コア230'を構成する1次元フォトニック結晶(周期的多層膜)の高屈折率層の中心における電場の強度分布を図52に示す。直角曲げ後の電場パターンは図47のフォトニック結晶導波路200Bよりも複雑なものとなり、0次お

よび1次モードが混ざり合っている。しかし、空気層への漏れ光はほとんど発生していない。

#### 【0293】

以上のように構成された第6実施形態によれば、以下の作用効果を奏する。

・多モード伝播であっても完全閉じ込め条件が満たされていれば漏れ光が発生しないことがわかる。従って、導波路の幅や形状を変えて共振器とすることも容易である。

#### 【0294】

##### [第7実施形態]

図53は第7実施形態に係るフォトニック結晶導波路200Dを示している。

フォトニック結晶導波路200Dでは、1次元フォトニック結晶で構成されたコア230Bの入射部分の導波路幅を、多モード伝播条件となる広さとし、途中でテーパ状に導波路幅を狭くして単一モード導波路に変換する「テーパ導波路」としている。

#### 【0295】

単一モード条件を満たすためには、コアの導波路幅2Lを狭くする必要がある。ところが、例えば導波路幅2Lが1 $\mu$ m程度の場合、コア直径が10 $\mu$ m程度の単一モード光ファイバとの結合が困難となり、損失が大きくなる。

#### 【0296】

単一モード条件を満たすコアの導波路幅2Lを、コアの入射面もしくは出射面の近くでテーパ状に拡大すると、外部との接続効率を改善することができる。コアのテーパ部分の形状を設計する場合には、テーパ部分での損失や高次モードの発生が十分に少なくなることを、電磁波シミュレーションなどによって確認しておくことが望ましい。

##### (1) 周期的多層膜の構造:

図47のフォトニック結晶導波路200Bと同じである。

##### (2) コア(導波路)230Bの構造:

コア230Bの入射端面後における導波路構造は、直線導波路231Bと、ダウンテーパ型のテーパ導波路232Bと、直線導波路233Bとからなるダウンテーパ構造とした。直線導波路231BのX方向の幅は5 $\mu$ m、Z方向の長さは5 $\mu$ mである。テーパ導波路232BのX方向の幅は5 $\mu$ mから3 $\mu$ mに変化し、Z方向の長さは6 $\mu$ mである。直線導波路233BのX方向の幅は3 $\mu$ m、Z方向の長さは10 $\mu$ mである。

##### (3) 入射光:

(真空中の波長)  $\lambda_0 = 1540 \text{ nm}$  ( $a/\lambda_0 = 0.2792$ )

(偏光) TE偏光(電場の向きがX方向方向)

##### (4) フォトニック結晶導波路200Dの入射端面と位相格子240の構造:

図47のフォトニック結晶導波路200Bと同じである。

#### 【0297】

このような構成のフォトニック結晶導波路200Dについてのシミュレーション結果として、コア230Bの高屈折率層の中心における電場の強度分布を図54に示す。直線導波路231Bの導波路幅5 $\mu$ mの伝播光が、テーパ導波路232Bにより波面の乱れなしに幅3 $\mu$ mの単一モード導波路である直線導波路233Bに結合していることわかる。テーパ導波路232B部分でのリークは少ない。

#### 【0298】

以上のように構成された第7実施形態によれば、以下の作用効果を奏する。

フォトニック結晶導波路200Dのコア230Bは、その入射部分である直線導波路231Bの導波路幅を、多モード伝播条件となる広さとし、途中でテーパ導波路232Bにより導波路幅を狭くして単一モード導波路(直線導波路233B)に変換する構成になっている。このようなフォトニック結晶導波路200Dを用いれば、例えば単一モード光ファイバ(コア直径10 $\mu$ m)と単一モード導波路である直線導波路233B(コア幅3 $\mu$ m)の接続が容易になる。

#### 【0299】

次に、上記各実施形態で説明したフォトニック結晶導波路や均質媒体導波路を用いた光



学素子について説明する。

導波路型の光学素子は均質媒体導波路を用いて実現されており、また2次元フォトニック結晶欠陥導波路などを用いたものも盛んに提案、研究されている。本発明による導波路を用いれば、こういった光学素子のなかの多くを、以下に列挙した特徴を備えた導波路型光学素子として置きかえることができる。

#### 【0300】

- ・急激曲げが可能であり、導波路や素子の配置が自由なので、小型化・集積化が容易になる。

- ・大きい分散や遅い群速度の伝播光が得られるので、素子の機能を高めることができる。あるいは、素子自体を小型化することができる。

#### 【0301】

- ・単純な多層膜を基本構造とし、フォトニック結晶の屈折率差が小さくても良いので低コストで製作することができる。

- ・完全閉じ込めも可能なので、共振器などにも応用できる。

#### 【0302】

##### [第8実施形態]

図55は、第8実施形態に係る光学素子としての方向性結合器300Aを示している。

この方向性結合器300Aは、基板301と、基板301上に形成された2つの導波路302、303とを備え、各導波路302、303は、所定の結合長L1にわたり結合領域302a、303aで近接するように屈曲して形成されている。各導波路302、303は、上述したフォトニック結晶導波路、例えば図22に示すフォトニック結晶導波路200で構成されている。

#### 【0303】

導波路302の両側端面であるポートP1、P3には位相格子311、313がそれぞれ設けられており、また、導波路303の両側端面であるポートP2、P4にも位相格子312a、314がそれぞれ設けられている。これら4つの位相格子311、312a、313、314は、図10に示す位相格子64或いは図15に示す位相格子70と同様の機能を有するものである。

#### 【0304】

この方向性結合器300Aは、例えば、単一モード光ファイバ321により伝送される入射光（信号光）A1がロッドレンズ331および位相格子311を介して導波路302に入射し、その結合領域302a、303aによって導波路302、303共に例えば50%の光に分岐される。分岐された信号光は、導波路302、303をそれぞれ通って、位相格子313、314およびロッドレンズ333、334を介して単一モード光ファイバ323、324にそれぞれ接合するようになっている。

#### 【0305】

単一モード光ファイバ322により伝送される入射光（信号光）B1がロッドレンズ332および位相格子312aを介して導波路303に入射する場合も、入射光A1の場合と同様である。

#### 【0306】

以上のように構成された第8実施形態によれば、以下の作用効果を奏する。

- ・各導波路302、303は上述したフォトニック結晶導波路200で構成されているので、各導波路302、303の急激曲げが可能であり、基板301上における各導波路の配置の自由度が増す。このため、上記特許文献2のような従来技術よりも、方向性結合器自体の小型化が可能になるとともに、基板上に他の素子と共に集積化して光モジュールを作製する際の集積化が容易になる。

#### 【0307】

- ・特に、各導波路302、303の2つの結合領域302a、303a前後の屈曲部において急激曲げが可能になるので、各導波路302、303全体の長さを、上記特許文献2のような従来技術より大幅に短くすることができる。

**【0308】**

・上述した従来技術（2次元フォトニック結晶を用いた欠陥導波路）では、平面方向（XZ方向）の閉じ込めはPBGにより行なわれているが、上下方向（Y方向）の閉じ込めは、より困難であり、伝播損失が大きくなる。また、その欠陥導波路では、導波路の上下共に空気層とする、いわゆる「エアブリッジ構造」などが知られているが、構造、工程ともに複雑となり、コスト高の原因となるという問題があった。したがって、このような従来の欠陥導波路を用いて方向性結合器を作製すると、伝播損失が大きく、コスト高になってしまう。

**【0309】**

これに対して、各導波路302、303を構成するフォトニック結晶導波路を、上述した完全閉じ込め条件を満たすように作製することで、伝播損失が小さくかつ低コストの方向性結合器を実現することができる。

**【0310】**

・各導波路302、303を構成するフォトニック結晶導波路を、上述した単一モード条件を満たすように作製することで、外部の単一モード光ファイバと効率良く結合させることが可能になり、単一モード光ファイバを用いた光システムを実現することができる。

**【0311】**

・フォトニック結晶導波路で構成された各導波路302、303では、大きい分散や遅い群速度の伝播光が得られる。そのため、2つの導波路302、303の結合領域302a、303aの結合長L1を従来の方向性結合器の導波路よりもはるかに短くすることができ、小型化を図ることができるとともに、方向性結合器の機能を高めることができる。

**【0312】**

・2つの導波路302、303は図21に示すフォトニック結晶50のような単純な周期的多層膜構造である1次元フォトニック結晶を基本構造とし、フォトニック結晶の屈折率差が小さくても良いので、2つの導波路302、303を含む方向性結合器300Aを低コストで製作することができる。

**【0313】****[第9実施形態]**

図56は、第9実施形態に係る光学素子としてのマッハツェンダー型光スイッチ350を示している。

**【0314】**

このマッハツェンダー型光スイッチ350は、基板301と、基板301上に形成された導波路とを備える。この導波路は、一つの直線状の導波路351と、この導波路351から分岐した2つの導波路352、353と、これら2つの導波路352、353が合流した一つの直線状の導波路354とからなる。これらの導波路351～354はそれぞれ、上述したフォトニック結晶導波路、例えば図22に示すフォトニック結晶導波路200で構成されている。導波路351、354の各端面には、図10に示す位相格子64或いは図15に示す位相格子70と同様の機能を有する位相格子356、357がそれぞれ設けられている。

**【0315】**

このマッハツェンダー型光スイッチ350は、単一モード光ファイバ361により伝送される入射光（信号光）A2がロッドレンズ363および位相格子356を介して導波路351に入射し、導波路351を通った後分岐される。分岐された信号光は、導波路352、353をそれぞれ通ってから再び合流し、導波路354を通った後、位相格子357およびロッドレンズ364を介して光ファイバ362に結合されるようになっている。

**【0316】**

導波路351内の伝播光（信号光）が2つの導波路352、353に分岐されてから、再び導波路354で合流する際に、導波路352、353をそれぞれ通った光信号の光路長差による位相差が $\pi$ の偶数倍であれば元の信号光のまま導波路354を通して出力される（オン状態）。一方、その位相差が奇数倍であれば、合流した伝播光は打ち消し合っ

、信号光は出力されない（オフ状態）。

#### 【0317】

このようなオン、オフをさせるため、マッハツェンダー型光スイッチ350では、2つの導波路352, 353の少なくとも片方に「電流注入」「光の照射」などの手段を加えて導波路の屈折率を変化させると、位相差が変化するのでオン／オフを切り替えることができる。

#### 【0318】

以上のように構成された第9実施形態によれば、以下の作用効果を奏する。

・マッハツェンダー型光スイッチ350の各導波路351～354は上述したフォトニック結晶導波路200で構成されているので、各導波路の急激曲げが可能であり、基板301上における各導波路の配置の自由度が増す。このため、上記特許文献3のような2次元フォトニック結晶を有する光スイッチと比べて、光スイッチ自体の小型化が可能になるとともに、基板上に他の素子と共に集積化して光モジュールを作製する際の集積化が容易になる。

#### 【0319】

特許文献3のような光スイッチでは、平面方向（XZ方向）の閉じ込めはPBGにより行なわれているが、上下方向（Y方向）の閉じ込めはより困難であり、伝播損失が大きくなる。また、その欠陥導波路では、上記「エアープリッジ構造」などが知られているが、構造、工程ともに複雑となり、コスト高の原因となるという問題があった。したがって、このような従来の欠陥導波路を用いてマッハツェンダー型光スイッチを作製すると、伝播損失が大きく、コスト高になってしまいます。

#### 【0320】

これに対して、各導波路351～354を構成するフォトニック結晶導波路を、上述した完全閉じ込め条件を満たすように作製することで、伝播損失が小さくかつ低コストの方向性結合器を実現することができる。

#### 【0321】

・各導波路351～354を構成するフォトニック結晶導波路を、上述した単一モード条件を満たすように作製することで、外部の単一モード光ファイバと効率良く結合させることが可能になり、単一モード光ファイバを用いた光システムを実現することができる。

#### 【0322】

・各導波路351～354は上記フォトニック結晶50のような1次元フォトニック結晶を基本構造とし、フォトニック結晶の屈折率差が小さくても良いので、各導波路351～354を含むマッハツェンダー型光スイッチ350を低コストで製作することができる。

#### 【0323】

##### [第10実施形態]

図57は、第10実施形態に係る光学素子としての対称マッハツェンダー型光スイッチ370を示している。

#### 【0324】

この対称マッハツェンダー型光スイッチ370は、基板301と、基板301上に形成された導波路とを備える。この導波路は、一つの直線状の導波路371と、この導波路371から分岐した2つの導波路372, 373と、これら2つの導波路372, 373の合流部から分岐した2つの直線状の導波路374, 375と、制御光用の導波路376, 377とからなる。これらの導波路371～377はそれぞれ、上述したフォトニック結晶導波路、例えば図22に示すフォトニック結晶導波路200で構成されている。

#### 【0325】

導波路371, 376, 377の各端面には、上記位相格子64或いは位相格子70と同様の機能を有する位相格子391～393がそれぞれ設けられている。また、導波路374, 375の各端面にも、同様の位相格子394, 395がそれぞれ設けられている。導波路372, 373には、非線形光学活性を有する成分を含ませた非線形部378, 3

79 がそれぞれ設けられている。

#### 【0326】

この対称マッハツェンダー型光スイッチ370は、単一モード光ファイバ381により伝送される信号光がロッドレンズ401および位相格子391を介して導波路371に入射し、導波路371を通った後分岐される。分岐された信号光は、導波路372, 373をそれぞれ通ってから再び合流し、その合流部から分岐した2つの導波路374, 375の一方を通った後、対応する位相格子394, 395およびロッドレンズ404, 405を介して光ファイバ384, 385にそれぞれ結合されるようになっている。

#### 【0327】

制御光C1, C2はそれぞれ、光ファイバ382, 383、ロッドレンズ402, 403、位相格子392, 393を介して導波路376, 377に入射させて、非線形部378, 379の非線形光学活性を有する成分を励起可能になっている。制御光C1で非線形部378, 379の前記成分を励起してその屈折率を変化させたとき、例えば、導波路372, 373の合流部における信号光の位相が一致していれば信号光が導波路375を通過して出力され、その位相が半波長ずれていれば、信号光が導波路374を通過して出力される。こうして制御光C1により導波路372の非線形部378の屈折率を変化させてスイッチングを行える。同様に、制御光C2により導波路373の非線形部379の屈折率を変化させてスイッチングを行えるようになっている。

#### 【0328】

スイッチング速度は非線形作用の緩和時間によって制限されるが、制御光C1とC2にわずかの時間差を設けると緩和過程を途中でキャンセルできるので、非常に短時間のスイッチングを実現できる。

#### 【0329】

以上のように構成された第10実施形態によれば、以下の作用効果を奏する。

- ・2次元フォトリック結晶の欠陥導波路を用いた上記非特許文献1と同様の対称マッハツェンダー型光スイッチを、1次元フォトリック結晶によるフォトリック結晶導波路を用いて低コストで実現することができる。

#### 【0330】

- ・各導波路371～377は上述したフォトリック結晶導波路200で構成されているので、各導波路の急激曲げが可能であり、基板301上における各導波路の配置の自由度が増す。このため、上記非特許文献1よりも、光スイッチ自体の小型化が可能になるとともに、基板上に他の素子と共に集積化して光モジュールを作製する際の集積化が容易になる。

#### 【0331】

- ・上記非特許文献1のように2次元フォトリック結晶の欠陥導波路を用いた光スイッチでは、平面方向(XZ方向)の閉じ込めはPBGにより行なわれているが、上下方向(Y方向)の閉じ込めは、より困難であり、伝播損失が大きくなる。また、その欠陥導波路では、いわゆる「エアーブリッジ構造」などが知られているが、構造、工程ともに複雑となり、コスト高の原因となるという問題があった。これに対して、各導波路302, 303を構成するフォトリック結晶導波路を、上述した完全閉じ込め条件を満たすように作製することで、伝播損失が小さくかつ低コストの方向性結合器を実現することができる。

#### 【0332】

- ・各導波路371～377を構成するフォトリック結晶導波路を、上述した単一モード条件を満たすように作製することで、外部の単一モード光ファイバと効率良く結合させることが可能になり、単一モード光ファイバを用いた光システムを実現することができる。

#### 【0333】

- ・各導波路371～377は図21に示すフォトリック結晶50のような単純な周期的多層膜構造である1次元フォトリック結晶を基本構造とし、フォトリック結晶の屈折率差が小さくても良いので、各導波路371～377を含む対称マッハツェンダー型光スイッチ370を低コストで製作することができる。

## 【0334】

## [第11実施形態]

導波路状の光回路素子として、光遅延線がある（例えば、上記非特許文献2参照）。光遅延線は導波路の光学長を長く取ることによって容易に実現できる素子であるが、均質媒体導波路の場合は曲げ半径をあまり小さくできないので広い面積を必要とする。図58に示すような2次元フォトニック結晶を用いた欠陥導波路410による従来の光遅延線の場合は、急峻曲げにより光遅延線をコンパクトにまとめることができるが、曲げ損失や反射光の発生しやすい急峻曲げの回数が増えることは、素子として好ましくない。

## 【0335】

図59は、第12実施形態に係る光学素子としての光遅延線420を示している。この光遅延線420は、基板301上にそれぞれ形成された連続する一つの導波路を含み、この一つの導波路は、2つの直線状の導波路421、422と遅延部分423とからなる。遅延部分423は、導波路421、422間で、円形状に延びている。導波路421、422と遅延部分423を含む一つの導波路は、上述したフォトニック結晶導波路、例えば図22に示すフォトニック結晶導波路200で構成されている。導波路421、422の各端面には、位相格子425、426がそれぞれ設けられている。

## 【0336】

以上のように構成された第11実施形態によれば、以下の作用効果を奏する。

- ・導波路421、422と遅延部分423を含む一つの導波路に、上述した1次元フォトニック結晶による閉じ込めの強いフォトニック結晶導波路を用いているので、図59に示すような自由な形状の導波路とすることができる。従って、急峻曲げにこだわらず、わずかな曲率半径を持たせることによって曲げ損失を改善可能となり、小型化と低損失化を同時に実現する光遅延線420を設計することができる。

## 【0337】

- ・光遅延線420を、1次元フォトニック結晶によるフォトニック結晶導波路を用いて低コストで実現することができる。

- ・遅延部分423の急峻曲げが可能であり、基板301上における光遅延線420の配置の自由度が増す。このため、光遅延線420自体の小型化が可能になるとともに、基板上に他の素子と共に集積化して光モジュールを作製する際の集積化が容易になる。

## 【0338】

- ・導波路421、422と遅延部分423を含む一つの導波路を構成するフォトニック結晶導波路を、上述した単一モード条件を満たすように作製することで、外部の単一モード光ファイバと効率良く結合させることが可能になり、単一モード光ファイバを用いた光システムを実現することができる。

## 【0339】

- ・導波路421、422と遅延部分423を含む一つの導波路は上記フォトニック結晶50のような単純な周期的多層膜構造である1次元フォトニック結晶を基本構造とし、フォトニック結晶の屈折率差が小さくても良いので、光遅延線420を低コストで製作することができる。

## 【0340】

## [第12実施形態]

図60は、第12実施形態に係る光学素子としての光遅延線430を示している。この光遅延線430は、基板301上にそれぞれ形成された連続する一つの導波路を含み、この一つの導波路は、2つの直線状の導波路431、432と遅延部分433とからなる。遅延部分433は、導波路431、432間で、半径が次第に小さくなるように複数の円形状に巻かれている。導波路431、432と遅延部分433を含む一つの導波路は、上述したフォトニック結晶導波路、例えば図22に示すフォトニック結晶導波路200で構成されている。導波路421、422の各端面にも、位相格子425、426がそれぞれ設けられている。

## 【0341】

以上のように構成された第12実施形態によれば、上記第11実施形態で得られる作用効果に加えて以下の作用効果を奏する。

・長い経路の遅延部分433を基板301上に小さな面積で配置することができ、小型化と集積化をさらに図ることができる。

#### 【0342】

##### [第13実施形態]

従来、2次元フォトニック結晶を用いた欠陥導波路の近傍に点欠陥を設置することにより、共振によって特定の周波数の伝播光を点欠陥に捕捉させて取り出す波長フィルタが知られている（上記特許文献4参照）。また、同様な点欠陥部分を線状導波路の近傍に設置し、導波路中を伝播する波動との共振により位相差を生じさせて、スイッチングに用いる技術も知られている（上記特許文献5参照）。

#### 【0343】

図61は、第13実施形態に係る光学素子としての点欠陥共振器440を示している。この点欠陥共振器440は、基板301と、この基板上に設けられた線状導波路441と、この線状導波路441の近傍に設置した大きさの異なる3つの点欠陥442～444とを備える。点欠陥は、導波路部分と同じ構成の1次元フォトニック結晶を例えば楕円形状としたものを用いることができる。線状導波路441は、上述したフォトニック結晶導波路、例えば図22に示すフォトニック結晶導波路200で構成されている。線状導波路441の両側端面には、位相格子445、446がそれぞれ設けられている。

#### 【0344】

以上のように構成された第13実施形態によれば、以下の作用効果を奏する。

・上記フォトニック結晶導波路で構成した線状導波路441の近傍に点欠陥442～444を設置することにより、共振によって特定の周波数の伝播光を点欠陥442～444に捕捉させて取り出すことができる。光路を逆転させれば、点欠陥442～444に照射した波長の信号を導波路側に取りこむこともできる。したがって、フォトニック結晶導波路を用いて、波長選択フィルタや光スイッチを構成することができる。

#### 【0345】

##### [第14実施形態]

図62は、第14実施形態に係る光学素子としての点欠陥共振器450を示している。この点欠陥共振器450は、基板301と、この基板上に設けられ、図22に示すようなフォトニック結晶導波路200で構成された線状導波路とを備える。この線状導波路は、一つの直線状の導波路451と、この導波路451から分岐した2つの導波路452、453と、これら2つの導波路の合流部から分岐した2つの直線状の導波路454、455とからなる。導波路452の近傍に点欠陥456を設置してある。導波路451、454、455の各端面には、位相格子457、458、459がそれぞれ設けられている。

#### 【0346】

点欠陥456部分の誘電率を電氣的、あるいは光学的な手段により変えると、線状の導波路452との共振周波数が変化するため、導波路452の伝播光の位相が変わり、出射光のポート（出力光A3、B3）を切り換えることができるようになっている。

#### 【0347】

以上のように構成された第14実施形態によれば、以下の作用効果を奏する。

・上記フォトニック結晶導波路で構成した線状の導波路452の近傍に設置した点欠陥456部分の誘電率を電氣的、あるいは光学的な手段により変えることにより、線状の導波路452との共振周波数が変化して、導波路452の伝播光の位相が変わり、出射光のポート（出力光A3、B3）を切り換えることができる。したがって、導波路中を伝播する波動との共振により位相差を生じさせて、スイッチングに用いることができる。

#### 【0348】

・導波路452と点欠陥456の間隔や、点欠陥456の大きさと形状などを自由に選択することができるので、設計と製作が容易である。これに対して、上記特許文献4、5のような2次元フォトニック結晶を用いた欠陥導波路の場合は、上記の条件が2次元周期の

整数倍に限られる、といった制約がある。そのため、多波長分離フィルターを構成するために2次元周期を段階的に変化させる、といった工夫が必要となっている。

#### 【0349】

##### [第15実施形態]

次に、第15実施形態に係る光学素子としての分散制御素子を、図63～図67に基づいて説明する。

#### 【0350】

光通信システムにおいて、光ファイバや光学素子に分散が生じるとパルスが広がるので信号が劣化してしまう。特に40Gbpsといった高速通信やDWDM（波長分割多重）通信はパルスの広がりの影響がでやすいので、システム全体の分散を小さくすることが非常に重要である。

#### 【0351】

システム全体の分散を小さくするためには、ある素子で分散の生じた信号を、それと逆の分散を生じる「分散制御素子」に通す方法が有効である。長距離のファイバーによる波長分散を補償する素子としては、分散補償ファイバがある。また、利得スイッチ半導体レーザーなどによって作られたレッドシフト・チャープニングの大きいパルスを、負の波長分散を有する光ファイバに通すことによって、パルス幅を圧縮できることも良く知られている。

#### 【0352】

本実施形態では、上記フォトニック結晶導波路を用い、分散の大きい条件の伝播光を用いれば、そのまま分散を制御する素子として用いることができる。以下の媒体A、B

A：屈折率  $n_A = 2.10$ （厚さ  $t_A = 0.5a$ ）

B：屈折率  $n_B = 1.45$ （厚さ  $t_B = 0.5a$ ）

を交互に重ね合わせた周期  $a$  の1次元フォトニック結晶について、

(イ) ブリルアンゾーンの中心線上の、第1バンド

(ロ) ブリルアンゾーンの境界線上の、第1バンド

(ハ) ブリルアンゾーンの中心線上の、第2バンド

(ニ) ブリルアンゾーンの境界線上の、第2バンド

によりZ方向方向に進行する伝播光について考える。上記の各伝播光のバンド図上での位置は図63に示す。各伝播光(イ)～(ニ)について入射光の波長(横軸)と分散(縦軸)の関係をバンド計算から求めたものを、図64～図67の各グラフに示してある。図64～図67の各グラフにおいて、横軸の単位は  $a$ 、縦軸の単位は  $1/c a$  ( $c$  は光速)であり、例えば  $a = 1000 \text{ nm}$  の場合、横軸の1は  $1000 \text{ nm}$  に相当し、縦軸の1はおよそ  $3.3 \text{ ps/nm/m}$  (長さ  $1 \text{ m}$  の導波路について、波長差  $1 \text{ nm}$  あたり  $3.3 \text{ ps}$  の分散)に相当する。本計算では材料分散が考慮されていないが、分散の絶対値や変化が石英などの材料分散よりもはるかに大きいので、差し支えない。

#### 【0353】

以上のように構成された第15実施形態によれば、以下の作用効果を奏する。

・分散の大きい条件の伝播光を用いることにより、光通信システムにおいて分散の生じた信号に逆の分散を与えることができ、長距離の光ファイバによる波長分散を補償することができる。

#### 【0354】

・図66のグラフに示す上記伝播光(ニ)の場合を例にとると、入射光の波長が長くなるに従って分散が次の4つの領域で変化することがわかる。

・分散が正で、グラフは右下がり、ゼロ分散に至る(領域461)。

#### 【0355】

・分散が負で、グラフは右下がり、極小値に至る(領域462)。

・分散が負で、グラフは右上がり、ゼロ分散に至る(領域463)。

・分散が正で、グラフは右上がり、傾きは急激に大きくなる(領域464)。

#### 【0356】



上述した1次元フォトリック結晶の周期  $a$  は任意に選ぶことができるので、制御対象となる周波数帯域に合わせて、どの領域でも分散制御に用いることができる。例えば、領域462の分散は通常の単一モード光ファイバー(SMF)の逆になっているので、SMFの分散補償に用いることができる。また、領域464では正の分散が非常に大きくなるので、短い導波路でもパルス圧縮を行なうことができる。ただし、この場合圧縮できるのはブルーシフト・チャージングのかかったパルスである。

#### 【0357】

・図66に示す伝播光(ハ)の場合でも、分散は図67に示す伝播光(ニ)の場合と同様な変化を示すので、分散制御に有用である。

・図64に示す伝播光(イ)や図65に示す伝播光(ロ)ももちろん分散制御に用いることができるが、伝播光(ハ)、(ニ)のほうが利用しやすい。

#### 【0358】

##### [第16実施形態]

次に、第16実施形態に係る光学素子としての光増幅素子500を、図68に基づいて説明する。

#### 【0359】

光増幅素子500は、図21に示すフォトリック結晶導波路200と同様のコア511とクラッド512を有するフォトリック結晶導波路510を用いて構成されている。ただし、本例のフォトリック結晶導波路510は、そのコア511にエルビウム、ビスマスなどの発光物質を含ませており、この点でフォトリック結晶導波路200とは異なる。フォトリック結晶導波路510は基板301上に形成されており、コア511の一端面511a、他端面511bには位相格子513、514がそれぞれ設けられている。これらの位相格子513、514は、図10に示す位相格子64或いは図15に示す位相格子70と同様の機能を有するものである。

#### 【0360】

コア511にエルビウム、ビスマスなどの発光物質を含ませるには、

- ・周期的多層膜構造のコア511の材料に発光物質を含ませる、
  - ・発光物質そのものをコア511の材料として用いる、
- などの方法が考えられる。

#### 【0361】

以上のように構成された第16実施形態によれば、以下の作用効果を奏する。

・光増幅素子500のフォトリック結晶導波路510にポンプ光516を照射して、このポンプ光516でコア511に含ませてあるエルビウム、ビスマスなどの発光物質を励起することにより、入射した信号光517が増幅された信号光518を取り出すことができる。

#### 【0362】

・フォトリック結晶導波路510を上述した完全閉じ込め条件を満たすように作製することで、外部の単一モード光ファイバと効率良く結合させることが可能になる。

##### [第17実施形態]

次に、第17実施形態に係る光学素子としての電極付導波路素子600を、図69に基づいて説明する。なお、以下の説明で、図68と同様の部材には同一の符号を付して重複した説明を省略する。

#### 【0363】

この電極付導波路素子600は、図68のフォトリック結晶導波路510と同様のフォトリック結晶導波路610を用いて構成されている。ただし、本例のフォトリック結晶導波路610は、そのコア611には非線形特性を有する物質(以下、「非線形物質」という。)を含ませてあり、この点でフォトリック結晶導波路510と異なる。

#### 【0364】

また、この電極付導波路素子600では、フォトリック結晶導波路610の上下のクラッド512の全体を挟むように電極520、521が設けられている。これらの電極52

0, 521は、例えば酸化インジウム錫 (Indium Tin Oxide) 膜などで構成された透明電極である。両電極520, 521は、導線522を介して電源523に接続されている。両電極520, 521に印加する電圧或いは電流を制御することにより、フォトニック結晶導波路610 (非線形物質) の非線形作用を制御するように構成されている。

#### 【0365】

コア511に非線形物質を含ませるには、

- ・周期的多層膜構造のコア611の材料に非線形物質を含ませる、
  - ・非線形物質そのものをコア611の材料として用いる、
- などの方法が考えられる。

#### 【0366】

以上のように構成された第17実施形態によれば、以下の作用効果を奏する。

- ・電極520, 521に印加する電圧や電流を制御することにより、フォトニック結晶導波路610のコア611に含ませてある非線形物質の非線形作用を制御することができる。これにより、群速度異常による非線形効果を可変にできるとともに、非線形効果の大きい非線形素子を実現することができる。

#### 【0367】

・なお、本実施形態の応用例として、図59に示す光遅延線420の遅延部分423や図60に示す光遅延線430の遅延部分433を構成するフォトニック結晶導波路に、図69と同様に電極を取りつけるようにしても良い。この構成とすることによって、光遅延線420の遅延部分423や光遅延線430の遅延部分433による遅延量を前記両電極に印加する電場 (電圧) や電流により制御することができる。このように遅延量を制御可能な光遅延線を用いることにより、光スイッチなどを作ることが可能になる。

#### 【0368】

##### [第18実施形態]

次に、第18実施形態に係る光学素子としての電極付導波路素子600Aを、図70に基づいて説明する。

#### 【0369】

この電極付導波路素子600Aは、図69に示す上記第17実施形態の電極付導波路素子600と同様の構成を有し、レーザ光の波長変換を可能にしたものである。

図70に示す電極付導波路素子600Aを高温状態に置き、直流電圧を印加した状態で常温に戻す処理を行う。このような処理はポーリングと呼ばれており、フォトニック結晶導波路610のコア611に含ませた非線形物質の特性を大きくする効果がある。

#### 【0370】

以上のように構成された第18実施形態によれば、以下の作用効果を奏する。

- ・ポーリングした電極付導波路素子600Aのフォトニック結晶導波路610に、レーザ光である入射光617をフォトニック結晶導波路610に入射させると、例えば強い第2高調波 (SHG), 第3高調波 (THG) の出射光618を発生させることができる。したがって、レーザー光の波長変換をすることができる。

#### 【0371】

##### [第19実施形態]

次に、第19実施形態に係る光学素子としての電極付導波路素子500Aを、図71に基づいて説明する。この電極付導波路素子500Aは、図68に示す上記第16実施形態の光増幅素子500のフォトニック結晶導波路510と同様に、そのコア511にエルビウム、ビスマスなどの発光物質を含ませたフォトニック結晶導波路510Aを用いている。このフォトニック結晶導波路510Aには、図69に示す上記第17実施形態と同様に透明電極である電極520, 521が設けられており、これらの電極520, 521は導線522を介して電源523と接続されている。

#### 【0372】

以上のように構成された第19実施形態によれば、以下の作用効果を奏する。

- ・フォトニック結晶導波路510Aに入射光617を入射させた状態で、両電極520

、521に電圧を印加し或いは電流を流すことにより、入射光617が発光物質によって増幅された光を、電極520を介して上方へ出射させることができる。したがって、電極付導波路素子500Aを発光素子として構成することができる。

#### 【0373】

##### [第20実施形態]

次に、第20実施形態に係る光学素子としての電極付導波路素子600Bを、図72に基づいて説明する。この電極付導波路素子600Bは、図70に示す上記第18実施形態と同様のフォトニック結晶導波路610を用い、この導波路を挟むように同実施形態と同様に設けた電極520、521に印加する電圧や電流を変化させるための変調器620を備えた変調素子である。

#### 【0374】

以上のように構成された第20実施形態によれば、以下の作用効果を奏する。

・フォトニック結晶導波路610の電極520、521に印加する電圧や電流を変調器620により変化させることにより、入射光617に位相、振幅、偏波面、周波数などの変調を加えた変調された信号光630を出射させることができる。

##### [第21実施形態]

次に、第21実施形態に係る光学素子としての分光素子を、図78～図84に基づいて説明する。

#### 【0375】

上記特許文献6～11には、上述したように、分光素子として、「ブリルアンゾーン中央の高次バンド伝播光」を用いた形態のものが記述されている。

これに対して、本実施形態では、上述した「斜め端面入射」によりブリルアンゾーン境界線上のバンドに結合させ、高い効率の分光器とするものである。

#### 【0376】

図78(a)は本実施形態に係る分光素子の模式図である。図78に示す光学素子140は、一方向(Y方向)にのみ周期性を有する1次元フォトニック結晶により構成され、その一方向に垂直な方向(XZ平面方向)に電磁波(伝播光)が伝播するコア141と、クラッド層としての上下のクラッド142、143と、基板144とを備えている。なお、クラッド(クラッド多層膜)142は基板側クラッドであり、クラッド(クラッド多層膜)143は、空気側クラッドである。

#### 【0377】

コア141は、1次元フォトニック結晶の周期方向に平行ではない斜め端面(端面傾斜角度 $\phi$ )に、特定の角度で入射光(平面波)145を入射させた場合、第1バンド光はブリルアンゾーンの境界線146(図78(b)参照)上の伝播となりZ軸方向へ進行する。しかし、Y方向の閉じ込めが弱ければ、伝播光の一部は空気側あるいは基板側への屈折光となる。この屈折光の方向(角度 $\theta_1$ 、 $\theta_2$ )は入射光145の真空中での波長 $\lambda_0$ に対して一定であり、指向性の非常に良い光束となる。ブリルアンゾーン境界線146上のバンドを利用することによって、入射光145の波長変化に対して実効屈折率が大きく変化するため、 $\theta_1$ 、 $\theta_2$ の値は $\lambda_0$ が異なると大きく変化するので、高分解能の分波素子として利用することができる。

#### 【0378】

図7を参照すると、入射光の周波数変化に対する実効屈折率の変化が大きくなるのは、グラフの曲線が水平に近くなる波数ベクトルが「0」に近い領域、すなわち実効屈折率が1未満となる領域である。このような場合にはフォトニック結晶の上下の媒体を空気としても屈折光の漏れを防ぐことができなくなる。そこで、前述したようにフォトニック結晶をクラッド142および143として用いることにより、実効屈折率が1未満であっても上下方向における光閉じ込めが可能となる。ここで、上下のクラッド142、143の層数を違ったものとして閉じ込め効果に差をつけると、片方の表面だけから屈折光を取り出すこともできる。

#### 【0379】

また、クラッド142, 143による閉じ込め効果の強さを調節することにより、表面から出射される光束の幅W1、W2を変えることができる。たとえば、閉じ込め効果を小さく（クラッドの周期数を少なく）すれば伝播光のエネルギーは急速に屈折光となるので光束の幅は狭くなり、閉じ込め効果を大きく（クラッド142, 143の周期数を多く）すれば光束の幅は広がる。分光器の光束の幅に比例して波長分解能が良くなることは、通常のプリズムや回折格子と同様であるので、クラッド142, 143の周期数によって波長分解能を変えることもできる。もちろん、光束の幅を広くするほど素子のサイズは大きくする必要がある。

#### 【0380】

本発明者らは、上述のような原理を元に分光素子を実際に作製し、分波特性や入射光の利用効率を評価した。以下、具体的な内容について詳細に説明する。

(試作例1)

#### 【0381】

試作例1の分光素子140Aは、石英の基板144A上に、以下の表1に示す構成の多層膜を製膜して構成した。

#### 【0382】

【表1】

(試作例1)		
基板		
基板側クラッド	$\text{Ta}_2\text{O}_5$ 195nm $\text{SiO}_2$ 455nm . . . $\text{Ta}_2\text{O}_5$ 195nm $\text{SiO}_2$ 455nm	クラッド周期 650 nm 10層(5周期) 膜厚比: 3:7
コア	$\text{Ta}_2\text{O}_5$ 153nm $\text{SiO}_2$ 357nm . . . $\text{Ta}_2\text{O}_5$ 153nm $\text{SiO}_2$ 357nm	コア周期 510 nm 40層(20周期) 膜厚比: 3:7
空気側クラッド	$\text{Ta}_2\text{O}_5$ 195nm $\text{SiO}_2$ 455nm . . . $\text{Ta}_2\text{O}_5$ 195nm $\text{SiO}_2$ 455nm	クラッド周期 650 nm 20層(10周期) 膜厚比: 3:7
(空気層)		

分光素子140Aの外形や斜め入射面の角度を図79(a), (b)に示す。基板144Aの出射端面も斜めとして、出射光のフレネル反射を減らすようにした。

#### 【0383】

波長可変レーザーからの出射光（直線偏光）を偏波保持ファイバーで伝送し、その終端からの出射光をコリメートレンズで平行光束に直してから平凸円筒レンズで集光して、入射光とした。入射光スポットは開口数NA=0.1、長さ1mmの線分状である。上記入射光スポットを多層膜141Aの斜め端面のコア部分に一致させ、入射角度 $\phi_1$ を $15^\circ$ とした。入射光の偏光方向はTE偏光（電場がX軸方向）とした。なお、ここにいる「多層膜141A」は、コアと、基板側クラッドと、空気側クラッドの3つの部分を一緒に示してある。

#### 【0384】

多層膜141Aの斜め端面からの出射光の方向は、赤外線用CCDカメラにより測定した。図79(b)に示す出射光の角度 $\theta$ は図80に示すように変化した。入射波長の変化

1 nm について、出射角  $\theta$  の変化は  $0.15 \sim 0.30^\circ$  に達し、通常の回折格子の数倍に達していることがわかる。

【0385】

出射光束の強度を入射光束の強度で除して求めた効率は、入射波長 1550 nm の場合に 34 % が得られた。

(試作例 2)

【0386】

試作例 2 の分光素子 140 B は、光学ガラス BK7 の基板 144 B 上に、以下の表 2 に示す構成の多層膜を製膜して構成した。

【0387】

【表 2】

(試作例 2)		
基板		
基板側クラッド	$\text{Ta}_2\text{O}_5$ 172nm $\text{SiO}_2$ 268nm . . . $\text{Ta}_2\text{O}_5$ 172nm $\text{SiO}_2$ 268nm	クラッド周期 440 nm 10層(5周期) 膜厚比: 3.9:6.1
コア	$\text{Ta}_2\text{O}_5$ 132nm $\text{SiO}_2$ 308nm . . . $\text{Ta}_2\text{O}_5$ 132nm $\text{SiO}_2$ 308nm	コア周期 440 nm 40層(20周期) 膜厚比: 3:7
空気側クラッド	$\text{Ta}_2\text{O}_5$ 172nm $\text{SiO}_2$ 268nm . . . $\text{Ta}_2\text{O}_5$ 172nm $\text{SiO}_2$ 268nm	クラッド周期 440 nm 20層(10周期) 膜厚比: 3:7
(空気層)		

分光素子 140 B の外形や斜め入射面の角度を図 81 (a), (b) に示す。なお、同図に示す「多層膜 141 B」は、コアと、基板側クラッドと、空気側クラッドの 3 つの部分と一緒に示してある。

【0388】

試作例 1 と同様な入射光 (TE 偏光) を入射させて、入射角度  $\phi_1$  を  $43^\circ$  とした場合、出射光の角度  $\theta$  は図 82 に示すように変化した。入射波長の変化 1 nm について、出射角  $\theta$  の変化は  $0.25^\circ$  に達している。

【0389】

出射光束の強度を入射光束の強度で除して求めた効率は、入射波長 1550 nm の場合に 56 % が得られた。

(試作例 3)

【0390】

試作例 3 の分光素子 (図示省略) は、光学ガラス BK7 の基板上に、以下の表 3 に示す構成の多層膜を製膜して構成した。

【0391】

【表 3】

(試作例 3)		
基板		
基板側クラッド	$\text{Ta}_2\text{O}_5$ 172nm $\text{SiO}_2$ 268nm . . . $\text{Ta}_2\text{O}_5$ 172nm $\text{SiO}_2$ 268nm	クラッド周期 440 nm 20層(10周期) 膜厚比: 3.9:6.1
コア	$\text{Ta}_2\text{O}_5$ 132nm $\text{SiO}_2$ 308nm . . . $\text{Ta}_2\text{O}_5$ 132nm $\text{SiO}_2$ 308nm	コア周期 440 nm 40層(20周期) 膜厚比: 3:7
空気側クラッド	$\text{Ta}_2\text{O}_5$ 172nm $\text{SiO}_2$ 268nm . . . $\text{Ta}_2\text{O}_5$ 172nm $\text{SiO}_2$ 268nm	クラッド周期 440 nm 20層(10周期) 膜厚比: 3:7
(空気層)		

試作例 3 の分光素子 140C (図示省略) は上記試作例 2 の分光素子 140B とほぼ同じであるが、基板側クラッドの周期数が異なっている。分光素子の外形や斜め入射面の角度は試作例 2 (図 81) と同じである。試作例 2 と同様な入射光 (TE 偏光) を入射させて、入射角度  $\phi_1$  を  $43^\circ$  とした場合、出射光の角度  $\theta$  の変化は図 82 に示すものと同じであったが、基板側の出射光束の強度を入射光束の強度で除して求めた効率、入射波長 1550 nm の場合に 24% であった。

## 【0392】

試作例 3 の分光素子は両側 (上下) のクラッドの周期数が同一なので、屈折光も基板側と空気側に分割されたために試作例 2 と比べて効率が低下している。その反面、閉じ込めが強くなったので伝播長さあたりの屈折光が弱くなり、結果として出射光束の幅は大きくなっている。分光器としての波長分解能は向上している。

## (試作例 4)

## 【0393】

この試作例は、試作例 3 の分光素子 140C を、図 83 に示す筐体に組み込んで、DWDM 用波長モニターモジュールとした。

図 83 に示す DWDM 用波長モニターモジュール 150 は、以下のように構成されている。

## 【0394】

・入力光 (TE 偏光) を導く偏波面保持ファイバ 151 の終端にロッドレンズによるコリメータ 152 を設置して平行光束とし、さらに円筒レンズ 153 (直径  $\phi$  3 mm 円柱、材質は光学ガラス BK7) により入射スポットとする。

## 【0395】

・入射スポットに試作例 3 の分光素子 140C の斜め端面を調整して取り付け、基板側表面からの出射光束を有効径  $\phi$  6 mm、焦点距離 15 mm の対物レンズ (集光レンズ) 154 により結像させる。

## 【0396】

・結像面には、間隔 50  $\mu\text{m}$  で 22 個のフォトディテクタを並べたセンサアレイ 155 を取り付ける。

・コリメータ 152、円筒レンズ 153 および分光素子 140C は、ホルダ 156 に一

体に保持されている。このホルダ 156 および対物レンズ 154 が筐体 157 に固定されている。

#### 【0397】

入射光の波長を 1550 nm 近傍とすると、隣接するディテクタには波長差 0.8 nm の光信号のスポットがそれぞれ結像する。波長差 0.8 nm は周波数差 100 GHz に相当し、いわゆる DWDM（高密度波長分割多重）の通信に用いられる波長差である。温度の変化による波長ズレを小さくするために、筐体と主な金属部品は無膨張金属（インバー）製である。

#### 【0398】

入射光源の波長を 1550 nm に固定して、センサアレイ 155 の位置を図 83 における上下方向に変えて、単一のセンサの出力値をプロットしたグラフを図 84 に示す。隣接するセンサの位置（±50 μm）まで動かした場合のクロストークは -15 dB であった。実際の使用時には、センサアレイ 155 は筐体 157 と接着して固定する。

#### 【0399】

以下、上記各実施形態から把握できる技術思想について説明する。

（1）請求項 1～32 のいずれか一つに記載のフォトニック結晶導波路或いは均質媒体導波路を用いた光学素子であって、一つの直線状の導波路（371）と、該導波路（371）から分岐した 2 つの導波路（372, 373）と、これら 2 つの導波路の合流部から分岐した 2 つの直線状の導波路（374, 375）と、制御光用の導波路（376, 377）とを有する対称マッハツェンダー型光スイッチ（370）として構成され、前記各導波路〔371～377〕は前記フォトニック結晶導波路或いは前記均質媒体導波路のいずれかで構成され、前記 2 つの導波路（372, 373）には非線形光学活性を有する成分を含ませた非線形部（378, 379）がそれぞれ設けられていることを特徴とする。

#### 【0400】

この構成によれば、次の作用効果を奏する。

・ 2次元フォトニック結晶の欠陥導波路を用いた上記非特許文献 1 と同様の対称マッハツェンダー型光スイッチを、1次元フォトニック結晶によるフォトニック結晶導波路或いは均質媒体導波路を用いて低コストで実現することができる。各導波路（371～377）はフォトニック結晶導波路或いは均質媒体導波路で構成されているので、各導波路の急激曲げが可能であり、基板上における各導波路の配置の自由度が増す。このため、上記非特許文献 1 よりも、光スイッチ自体の小型化が可能になるとともに、基板上に他の素子と共に集積化して光モジュールを作製する際の集積化が容易になる。

#### 【0401】

・ 上記非特許文献 1 のように 2次元フォトニック結晶の欠陥導波路を用いた光スイッチでは、平面方向（XZ 方向）の閉じ込めは PBG により行なわれているが、上下方向（Y 方向）の閉じ込めは、より困難であり、伝播損失が大きくなる。また、その欠陥導波路では、いわゆる「エアブリッジ構造」などが知られているが、構造、工程ともに複雑となり、コスト高の原因となるという問題があった。これに対して、各導波路を構成するフォトニック結晶導波路を、上述した完全閉じ込め条件を満たすように作製することで、伝播損失が小さくかつ低コストの方向性結合器を実現することができる。

#### 【0402】

・ 各導波路を構成するフォトニック結晶導波路を、上述した単一モード条件を満たすように作製することで、外部の単一モード光ファイバと効率良く結合させることが可能になる。これに対して、上述した従来の 2次元フォトニック結晶の欠陥導波路の場合、XZ 方向の PBG を完全なものとするためには、フォトニック結晶の屈折率差を大きくする必要があり、高屈折率物質（例えば  $n=3.48$  の Si）と空気の組み合わせなどが選ばれる。導波路のコアをなす欠陥部分の屈折率が非常に大きくなるため、シングルモード条件を満たすために導波路コアの断面が非常に小さくなる（典型的には  $1 \times 1 \mu\text{m}$  以下）。上記特許文献 1 の方法では導波路断面を  $2 \times 2 \mu\text{m}$  程度まで大きくしているが、外部のシングルモードファイバ（コア  $\phi 10 \mu\text{m}$  程度）との差が大きく、効率良く結合させることが難



しい。

【0403】

・各導波路をフォトニック結晶導波路とする場合、単純な周期的多層膜構造である1次元フォトニック結晶を基本構造とし、フォトニック結晶の屈折率差が小さくても良いので、各導波路を含む対称マッハツェンダー型光スイッチを低コストで製作することができる。

【0404】

(2) 請求項1～32のいずれか一つに記載のフォトニック結晶導波路或いは均質媒体導波路を用いた光学素子であって、線状導波路(441)と、該線状導波路の近傍に設けた少なくとも一つの点欠陥(442～444)とを備えた点欠陥共振器(波長フィルタ)として構成され、前記線状導波路を前記フォトニック結晶導波路或いは均質媒体導波路のいずれかで構成したことを特徴とする。

【0405】

この構成によれば、次の作用効果を奏する。

・前記フォトニック結晶導波路或いは均質媒体導波路で構成した線状導波路の近傍に点欠陥を設けることにより、共振によって特定の周波数の伝播光を点欠陥に捕捉させて取り出すことができる。光路を逆転させれば、点欠陥に照射した波長の信号を導波路側に取りこむこともできる。したがって、フォトニック結晶導波路を用いて、波長選択フィルタや光スイッチを構成することができる。

【0406】

(3) 請求項1～32のいずれか一つに記載のフォトニック結晶導波路或いは均質媒体導波路を用いた光学素子であって、一つの直線状の導波路(451)と、該導波路から分岐した2つの導波路(452, 453)と、これら2つの導波路の合流部から分岐した2つの直線状の導波路(454, 455)と、前記2つの導波路(452, 453)の少なくとも一方の近傍に設けた少なくとも一つの点欠陥とを有する点欠陥共振器として構成され、前記各導波路(451～455)が前記フォトニック結晶導波路或いは前記均質媒体導波路で構成されていることを要旨とする。

【0407】

この構成によれば、次の作用効果を奏する。

・上記フォトニック結晶導波路で構成した2つの導波路(452, 453)の少なくとも一方の近傍に設置した点欠陥部分の誘電率を電氣的、あるいは光学的な手段により変えることにより、その導波路との共振周波数が変化して、その導波路の伝播光の位相が変わり、出射光の出力位置(ポート)を切り換えることができる。したがって、導波路中を伝播する波動との共振により位相差を生じさせて、スイッチングに用いることができる。

【0408】

・導波路と点欠陥の間隔や、点欠陥の大きさと形状などを自由に選択することができるので、設計と製作が容易である。これに対して、上記特許文献4, 5のような2次元フォトニック結晶を用いた欠陥導波路の場合は、上記の条件が2次元周期の整数倍に限られる、といった制約がある。そのため、多波長分離フィルタを構成するために2次元周期を段階的に変化させる、といった工夫が必要となっている。

【0409】

(4) 請求項1～32のいずれか一つに記載のフォトニック結晶導波路或いは均質媒体導波路を用いた光学素子であって、前記フォトニック結晶導波路或いは前記均質媒体導波路のいずれかで構成した導波路(510)を備え、前記導波路のコア(511)に発光物質を含ませてあり、前記発光物質をポンプ光(516)で励起する光増幅素子として構成したことを特徴とする。

【0410】

この構成によれば、次の作用効果を奏する。

・フォトニック結晶導波路或いは均質媒体導波路のいずれかで構成され、コアに発光物質を含ませてある導波路にポンプ光を照射して、発光物質を励起することにより、入射し

た信号光が増幅された信号光を取り出すことができる。発光物質は、例えばエルビウム、ビスマスなどである。

【0411】

・導波路を上述した完全閉じ込め条件を満たすように作製することで、外部の単一モード光ファイバと効率良く結合させることが可能になる。

(5) 請求項1～32のいずれか一つに記載のフォトニック結晶導波路或いは均質媒体導波路を用いた光学素子であって、前記フォトニック結晶導波路或いは前記均質媒体導波路のいずれかで構成した導波路(610)を備え、前記導波路のコア(611)に非線形特性を有する物質を含ませてあり、前記導波路の前記一方向における両側表面に2つの電極を設けた電極付導波路素子(600A)として構成し、前記電極付導波路素子を高温状態に置き、前記2つの電極直流電圧を印加した状態で常温に戻す処理を行うことを特徴とする。

【0412】

この構成によれば、前記処理(ポーリング)により、フォトニック結晶導波路或いは均質媒体導波路のいずれかで構成した導波路のコアに含ませた非線形物質の特性を大きくする効果がある。ポーリングした電極付導波路素子の導波路に、レーザ光などの入射光を入射させると、例えば強い第2高調波(SHG)、第3高調波(THG)の出射光を発生させることができる。したがって、レーザー光の波長変換をすることができる。

【0413】

(6) 請求項1～32のいずれか一つに記載のフォトニック結晶導波路或いは均質媒体導波路を用いた光学素子であって、前記フォトニック結晶導波路或いは前記均質媒体導波路のいずれかで構成した導波路(610)を備え、前記導波路のコア(510A)に発光物質を含ませてあり、前記導波路の前記一方向における両側表面に、少なくとも一方が透明電極である2つの電極を設けた電極付導波路素子(500A)として構成したことを特徴とする。

【0414】

この構成によれば、フォトニック結晶導波路に入射光を入射させた状態で、両電極に電圧を印加し或いは電流を流すことにより、入射光が発光物質によって増幅された光を、2つの電極のうちの透明電極を介して上方へ出射させることができる。したがって、電極付導波路素子を発光素子として構成することができる。

【0415】

なお、この発明は以下のように変更して具体化することもできる。

上記フォトニック結晶導波路に用いるフォトニック結晶の材料としては、使用周波数帯域における透明性が確保できるものであれば特に限定はないが、一般的に多層膜の材料として用いられていて耐久性や製膜コストの点で優れたシリカ、シリコン、酸化チタン、酸化タンタル、酸化ニオブ、フッ化マグネシウム、窒化シリコンなどが適する材料である。上記材料は、スパッタリング、真空蒸着、イオンアシスト蒸着、プラズマCVDなどの良く知られた方法により、容易に多層膜とすることができる。

【0416】

・フォトニック結晶を構成する複数の材料間の屈折率比は大きくなるほど、波長分散なども大きくなる傾向があるので、そのような特性が必要な用途に対しては高屈折率材料と低屈折率材料を組合せることが望ましい。実用的に実現できる屈折率比は、例えば低屈折率材料として空気(屈折率1)、高屈折率材料としてInSb(屈折率 $n=4.21$ )を用いると4以上にすることができる(「微小光学ハンドブック」224頁、朝倉書店 1995年、参照)。

【0417】

・フォトニック結晶を構成する材料の屈折率比が小さくなると、偏光方向による特性の違いが小さくなる傾向があるので、偏波無依存を実現するためには屈折率比の小さい組合せも有用である。材料を適切に選定すれば、本発明の作用は通常使用される200nm～

20  $\mu$ m 程度の波長範囲で発揮される。

【0418】

・上記実施形態では、基板上に周期的多層膜構造のフォトニック結晶を用いたフォトニック結晶導波路やこれを用いた光学素子について説明したが、基板を用いず、周期的多層膜層だけから構成される、いわゆるエアブリッジ構造としても良い。

【0419】

・図40に示す第3実施形態の均質媒体導波路300では、均質物質で構成されたコア301のY方向に垂直な両側表面には、閉じ込め用クラッドとしてY方向に周期性を有する1次元フォトニック結晶で構成したクラッド312を設けてあるが、本発明はこれに限定されない。その閉じ込め用クラッドを、クラッド312に代えて、図46に示すクラッド202Aと同様に金属膜などの反射層としても良い。

【0420】

・図73～図77を用いて説明したフォトニック結晶導波路における「斜め端面とプリズム或いはミラーの組み合わせ」および「斜め端面と位相格子の組み合わせ」は、図40に示す均質媒体導波路300にも適用可能である。

【図面の簡単な説明】

【0421】

【図1】 フォトニック結晶内における光の伝播を示す模式図。

【図2】 フォトニック結晶のフォトニックバンド構造の一例を示す図。

【図3】 フォトニック結晶の端面に垂直入射した入射光とフォトニック結晶との結合をフォトニックバンドで示す説明図。

【図4】 フォトニック結晶の端面に垂直入射した入射光とフォトニック結晶との結合をブリルアンゾーンのZ方向のみに限定して示した図。

【図5】 フォトニック結晶の端面に斜め入射した入射光とフォトニック結晶との結合をフォトニックバンドで示す説明図。

【図6】 ブリルアンゾーンの境界線上での伝播が起こるように斜め入射した入射光とフォトニック結晶との結合をフォトニックバンドで示す説明図。

【図7】 ブリルアンゾーンの境界線上での伝播が起こるように斜め入射した入射光とフォトニック結晶との結合をブリルアンゾーンのZ方向のみに限定して示した図。

【図8】 交差する2方向の平面波による位相変調入射光を示す図。

【図9】 交差する3方向の平面波による位相変調入射光を示す図。

【図10】 フォトニック結晶の入射側および出射側に設置した周期aの位相格子による位相変調を示す模式図。

【図11】 ブリルアンゾーンの境界線上での、第1および第2バンドによる伝播光を模式的に示した図。

【図12】 ブリルアンゾーンの境界線上での、第1および第2バンドによる伝播光の合成による電場パターンを模式的に示した図。

【図13】 フォトニック結晶の端面に斜め入射した入射光とフォトニック結晶との結合をフォトニックバンドで示す説明図。

【図14】 交差する2方向の平面波の干渉による入射光の位相変調を示す図。

【図15】 フォトニック結晶の入射側および出射側に設置した周期2aの位相格子による位相変調を示す模式図。

【図16】 周期2aの位相格子と斜め入射による干渉波を利用する場合の計算例における位相格子の回折光を示す図。

【図17】 周期2aの位相格子と斜め入射による干渉波を利用する場合の計算例における電場パターンを示す図。

【図18】 周期2aの位相格子と斜め入射による干渉波を利用する場合で、位相格子を特定の条件で設置した場合の計算例における電場パターンを示す図。

【図19】 (a) ブリルアンゾーンの境界線上での伝播光を得るのに、斜め端面への平面波の入射を説明する図、(b) 斜め端面に入射角 $\theta_0$ で入射した入射光とフォト

ニック結晶との結合をフォトニックバンドで示す説明図。

【図 20】第 1 実施形態に係るフォトニック結晶導波路を用いた光学素子を示す斜視図。

【図 21】第 1 実施形態に係るフォトニック結晶導波路内における光の伝搬を示す模式図。

【図 22】図 21 のフォトニック結晶導波路のコアを示す斜視図。

【図 23】ブリルアンゾーン内の第 1 バンド上の点による伝播光の波数ベクトルを示す図。

【図 24】フォトニック結晶のコア厚さ  $2A$  の説明図。

【図 25】位相整合条件を満たす伝播光、すなわちモードの説明図。

【図 26】第 2 バンドによるモードを示す説明図。

【図 27】周期  $a$  のコアに周期  $b$  ( $a < b$ ) のクラッドをつけた場合のバンド図。

【図 28】 $Y$  方向  $m$  次モードのバンドを逆空間の  $XZ$  方向に示した説明図。

【図 29】ブリルアンゾーン境界伝播での垂直入射の場合におけるフォトニック結晶導波路の側面に露出する電場パターンを示す図。

【図 30】ブリルアンゾーン境界伝播での斜め入射の場合におけるフォトニック結晶導波路の側面に露出する電場パターンを示す図。

【図 31】ブリルアンゾーン境界伝播での伝播光が  $XZ$  平面内で  $Z$  方向に対して伝播角  $\phi$  傾いて進行する場合における位相整合条件の説明図。

【図 32】ブリルアンゾーン境界伝播での伝播角  $\phi$  に対して単一モード条件を満たす  $2L$  の範囲を模式的に示すグラフ。

【図 33】ブリルアンゾーン境界伝播での閉じ込め条件と単一モード条件を満たす  $2L$  の範囲を模式的に示すグラフ。

【図 34】図 33 とは異なる条件による同図と同様のグラフ。

【図 35】図 33 とは異なる条件による同図と同様のグラフ。

【図 36】クラッドの  $PBG$  による閉じ込めの説明図。

【図 37】第 2 実施形態のブリルアンゾーン中央伝播での斜め入射の場合におけるフォトニック結晶導波路の側面に露出する電場パターンを示す図。

【図 38】ブリルアンゾーン中央伝播での閉じ込め条件と伝播角  $\phi$  に対して単一モード条件を満たす  $2L$  の範囲を模式的に示すグラフ。

【図 39】図 38 とは異なる条件による同図と同様のグラフ。

【図 40】第 3 実施形態に係る導波路内における光の伝播を示す模式図。

【図 41】図 40 に示すコアのバンド図におけるモードを示す説明図。

【図 42】図 40 に示すコア内を高次モード伝播光が  $XZ$  平面内で伝播角  $\phi$  傾いて進行する場合にコア側面に露出する電場パターンを示す説明図。

【図 43】図 40 に示すコアの閉じ込め条件と、伝播角  $\phi$  に対して単一モード条件を満たす  $2L$  の範囲を模式的に示すグラフ。

【図 44】図 43 とは異なる条件による同図と同様のグラフ。

【図 45】図 43 とは異なる条件による同図と同様のグラフ。

【図 46】第 4 実施形態に係るフォトニック結晶導波路における光の伝播を示す模式図。

【図 47】第 5 実施形態に係るフォトニック結晶導波路を示す平面図。

【図 48】図 47 のフォトニック結晶導波路を示す斜視図。

【図 49】図 47 のフォトニック結晶導波路の入射側を示す平面図。

【図 50】図 47 のフォトニック結晶導波路のシミュレーション結果を示す説明図。

【図 51】第 6 実施形態に係るフォトニック結晶導波路を示す平面図。

【図 52】図 51 のフォトニック結晶導波路のシミュレーション結果を示す説明図。

【図 53】第 7 実施形態に係るフォトニック結晶導波路を示す平面図。

【図 54】図 53 のフォトニック結晶導波路のシミュレーション結果を示す説明図。

【図 55】第 8 実施形態に係る光学素子としての方向性結合器を示す斜視図。

【図 5 6】第 9 実施形態に係る光学素子としての光スイッチを示す平面図。

【図 5 7】第 10 実施形態に係る光学素子としての対称マッハツェンダー型全光スイッチを示す平面図。

【図 5 8】2 次元フォトニック結晶欠陥導波路による光遅延線の従来例を示す平面図。

【図 5 9】第 11 実施形態に係る光学素子としての光遅延線を示す平面図。

【図 6 0】第 12 実施形態に係る光学素子としての光遅延線を示す平面図。

【図 6 1】第 13 実施形態に係る光学素子としての点欠陥共振器を示す平面図。

【図 6 2】第 14 実施形態に係る光学素子としての点欠陥共振器を示す平面図。

【図 6 3】第 15 実施形態に係る光学素子としての分散制御素子の説明に用いるバンド図。

【図 6 4】図 6 3 の伝播光 (イ) について計算で求めた入射光の波長と分散の関係を示すグラフ。

【図 6 5】図 6 3 の伝播光 (ロ) について計算で求めた入射光の波長と分散の関係を示すグラフ。

【図 6 6】図 6 3 の伝播光 (ハ) について計算で求めた入射光の波長と分散の関係を示すグラフ。

【図 6 7】図 6 3 の伝播光 (ニ) について計算で求めた入射光の波長と分散の関係を示すグラフ。

【図 6 8】第 16 実施形態に係る光学素子としての光増幅素子を示す斜視図。

【図 6 9】第 17 実施形態に係る光学素子としての電極付導波路素子を示す斜視図。

【図 7 0】第 18 実施形態に係る光学素子としての電極付導波路素子を示す斜視図。

【図 7 1】第 19 実施形態に係る光学素子としての電極付導波路素子を示す斜視図。

【図 7 2】第 20 実施形態に係る光学素子としての電極付導波路素子を示す斜視図。

【図 7 3】(a) は斜め端面入射を示す模式図、(b) は結合バンドの位置を示す説明図。

【図 7 4】(a) ~ (f) は斜め端面にプリズムおよび鏡面を組み合わせた構成例を示す模式図。

【図 7 5】(a) は斜め端面に高屈折率プリズムを組み合わせた構成例を示す模式図、(b) はそのバンドによる説明図。

【図 7 6】斜め端面に回折格子を組み合わせた構成例を示す模式図、(b) は結合バンドの位置を示す説明図。

【図 7 7】(a) ~ (h) は斜め端面に回折格子を組み合わせた各種の構成例を示す模式図。

【図 7 8】(a) は第 21 実施形態に係る光学素子の原理を説明する模式図、(b) は結合バンドの位置を示す説明図。

【図 7 9】(a) は第 21 実施形態の試作例 1 に係る光学素子を示す斜視図、(b) はその側面図。

【図 8 0】試作例 1 に係る光学素子の角度分散を示すグラフ。

【図 8 1】(a) は第 21 実施形態の試作例 2 に係る光学素子を示す斜視図、(b) はその側面図。

【図 8 2】試作例 2 および試作例 3 に係る光学素子の角度分散を示すグラフ。

【図 8 3】第 21 実施形態の試作例 4 に係る DWDM 用波長モニターモジュールの概略構成を示す説明図。

【図 8 4】試作例 4 に係る波長分離特性を示すグラフ。

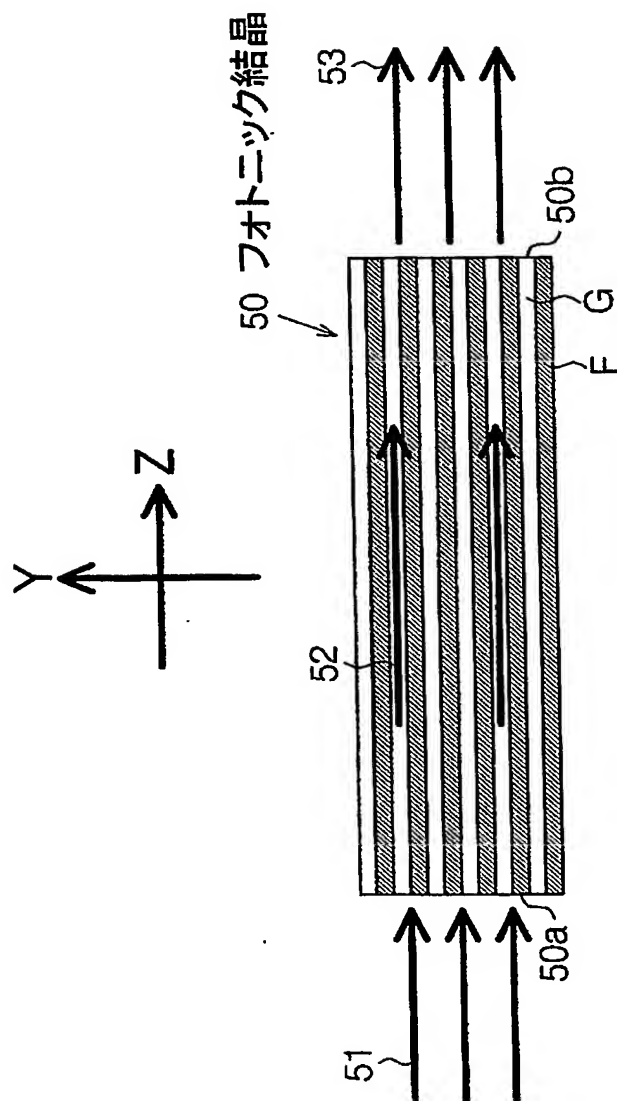
【符号の説明】

【0422】

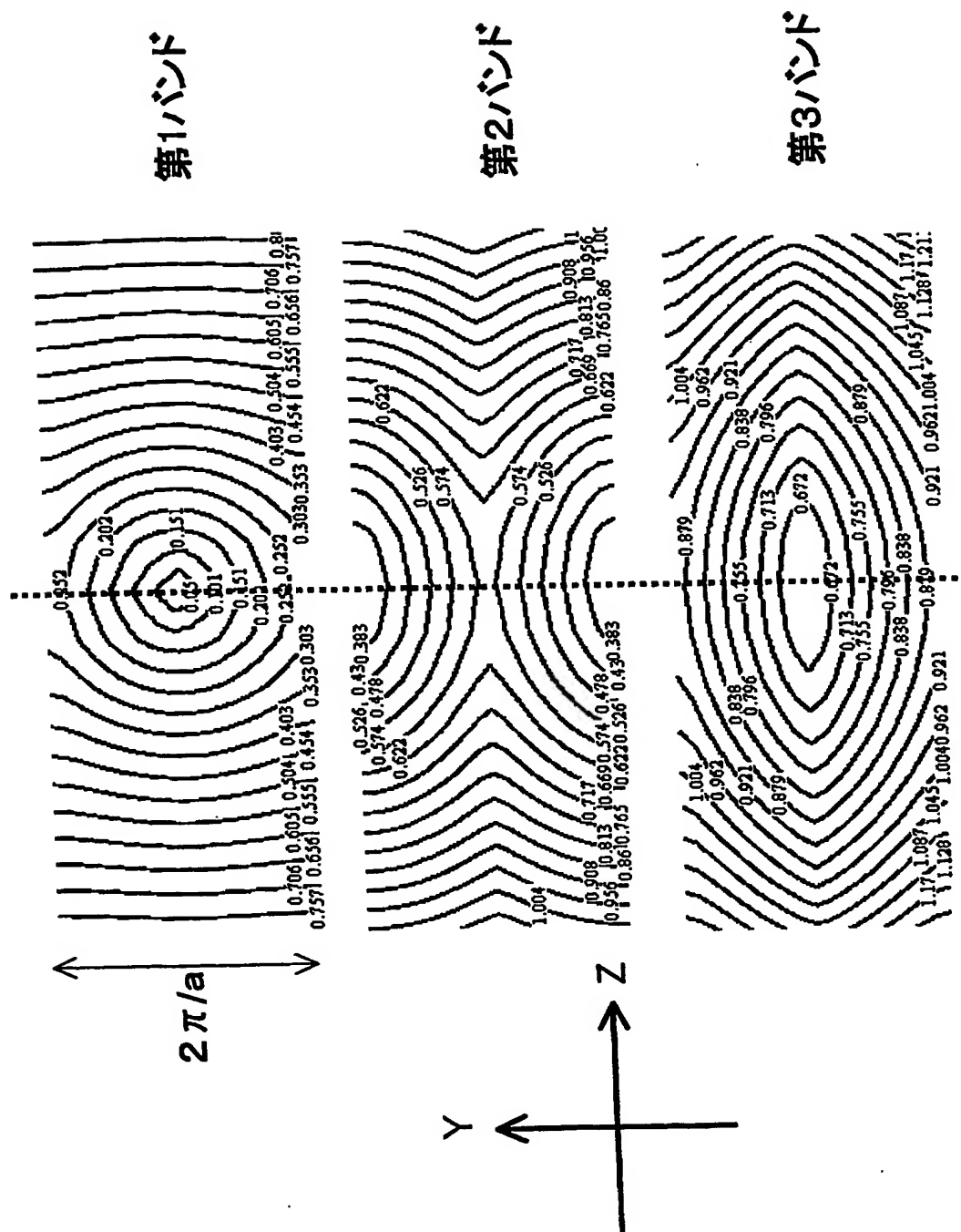
$\theta$ ,  $\theta_0$ …入射角、 $\psi$ ,  $\phi$ …伝播角、 $\lambda$ ,  $\lambda_0$ …波長、 $\Phi$ …位相変化量、 $a$ ,  $b$ ,  $2a$ …周期、 $n$ ,  $n_0$ ,  $n_M$ ,  $n_N$ ,  $n_s$ ,  $1$ …屈折率、 $A_1$ ,  $A_2$ ,  $B_1$ ,  $5_1$ ,  $8_0$ ,  $9_4$ ,  $1_4$ ,  $5_6$ ,  $1_7$ …入射光、 $L_1$ …結合長、 $t_A$ ,  $t_B$ ,  $t_M$ ,  $t_N$ ,  $2B$ …厚さ、 $5$

0…フォトニック結晶、50c, 112…斜め端面、52…伝播光、53, 68, 97, 618…出射光、60, 61…中心線、62a, 62b, 62c, 69…平面波、64, 67, 70, 71, 92, 93, 110, 240, 311, 312a, 313, 314, 356, 357, 391, 391-393, 392, 393, 394, 395, 425, 426, 445, 446, 457, 458, 459, 513, 514…位相格子、66a, 66b…回折光、86, 89, 100a, 100b, 125…境界線、112…端面、120A, 120B, 120C, 120D, 120E, 122, 137, 138, 139…プリズム、121a…鏡面、130…回折格子、140…光学素子、141, 201, 201A, 230, 230B, 301, 511, 611…コア、142, 143, 202, 202A, 312, 512…クラッド、200, 200A, 200B, 200C, 200D, 510, 510A, 610…フォトニック結晶導波路、300…均質媒体導波路、300A…方向性結合器、302, 303, 351, 351-354, 352, 353, 354, 371, 371-377, 372, 373, 374, 375, 376, 377, 421, 422, 431, 432, 451, 452, 453, 454, 455…導波路、302a, 303a…結合領域、350…マッハツェンダー型光スイッチ、420, 430…光遅延線、423, 433…遅延部分、500A, 600, 600A, 600B…電極付導波路素子、520, 521…電極、620…変調器。

【書類名】 図面  
【図 1】

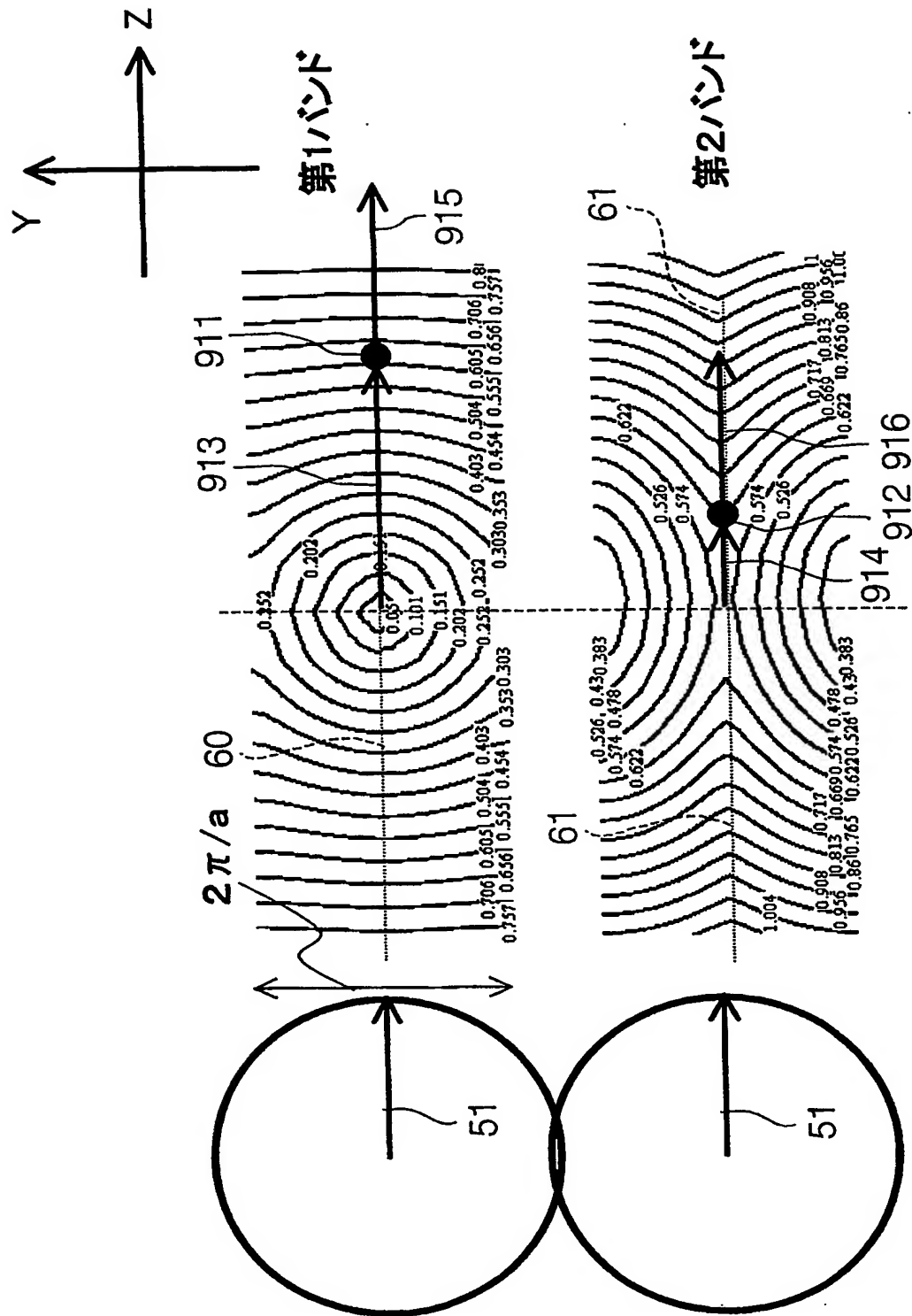


【圖 2】

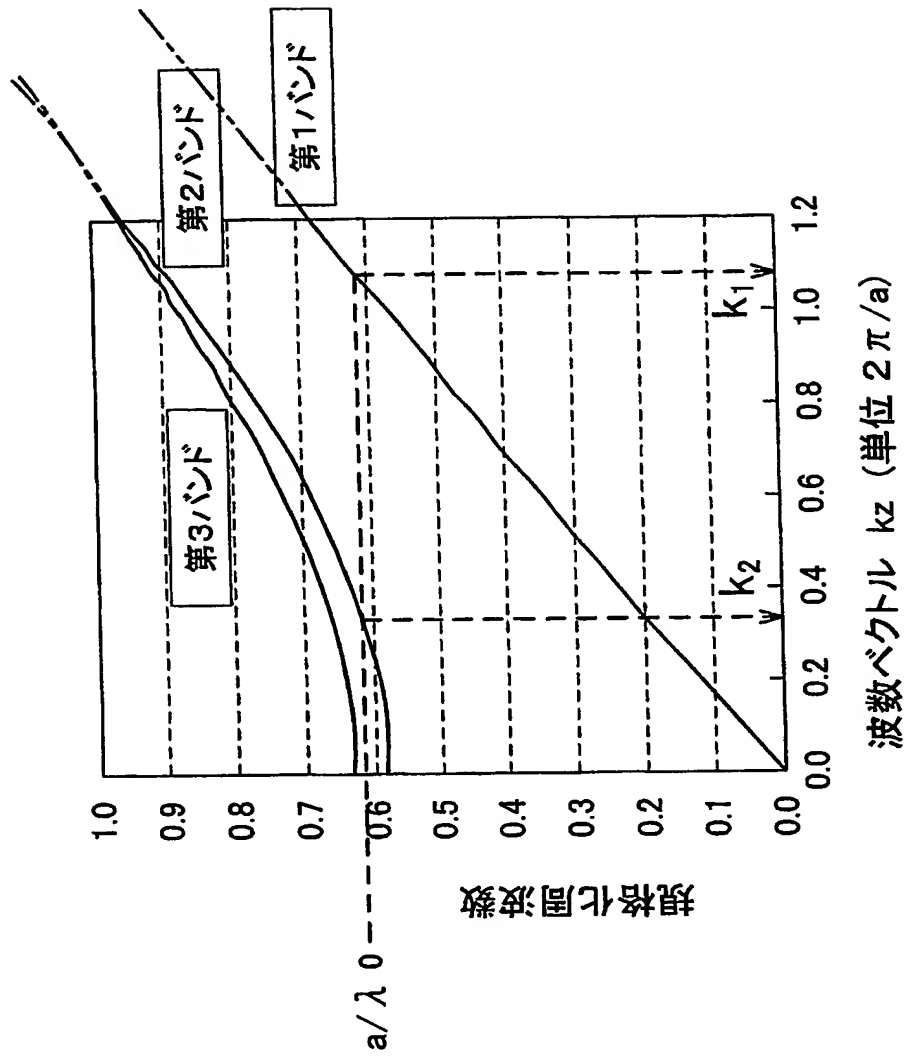




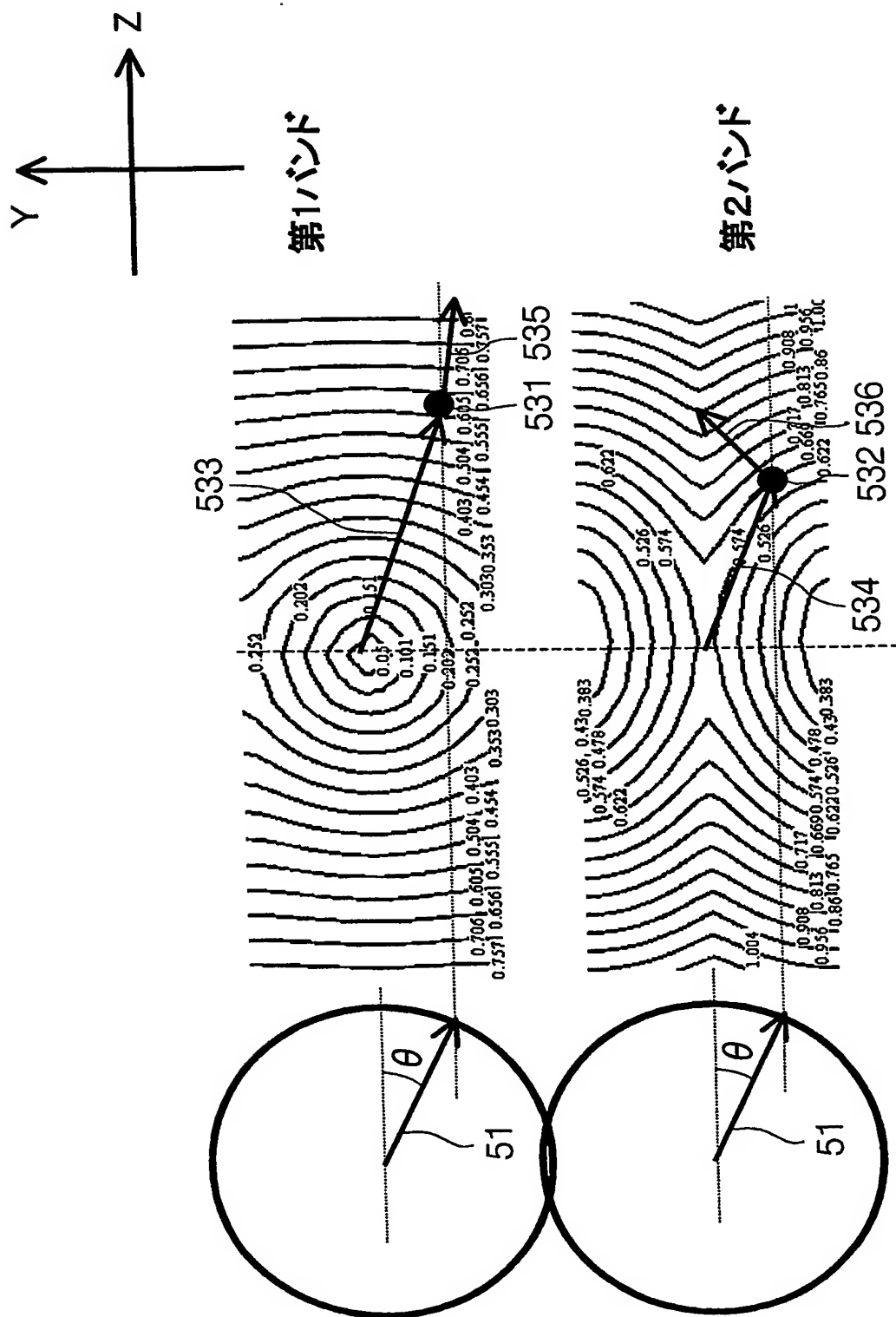
【図 3】



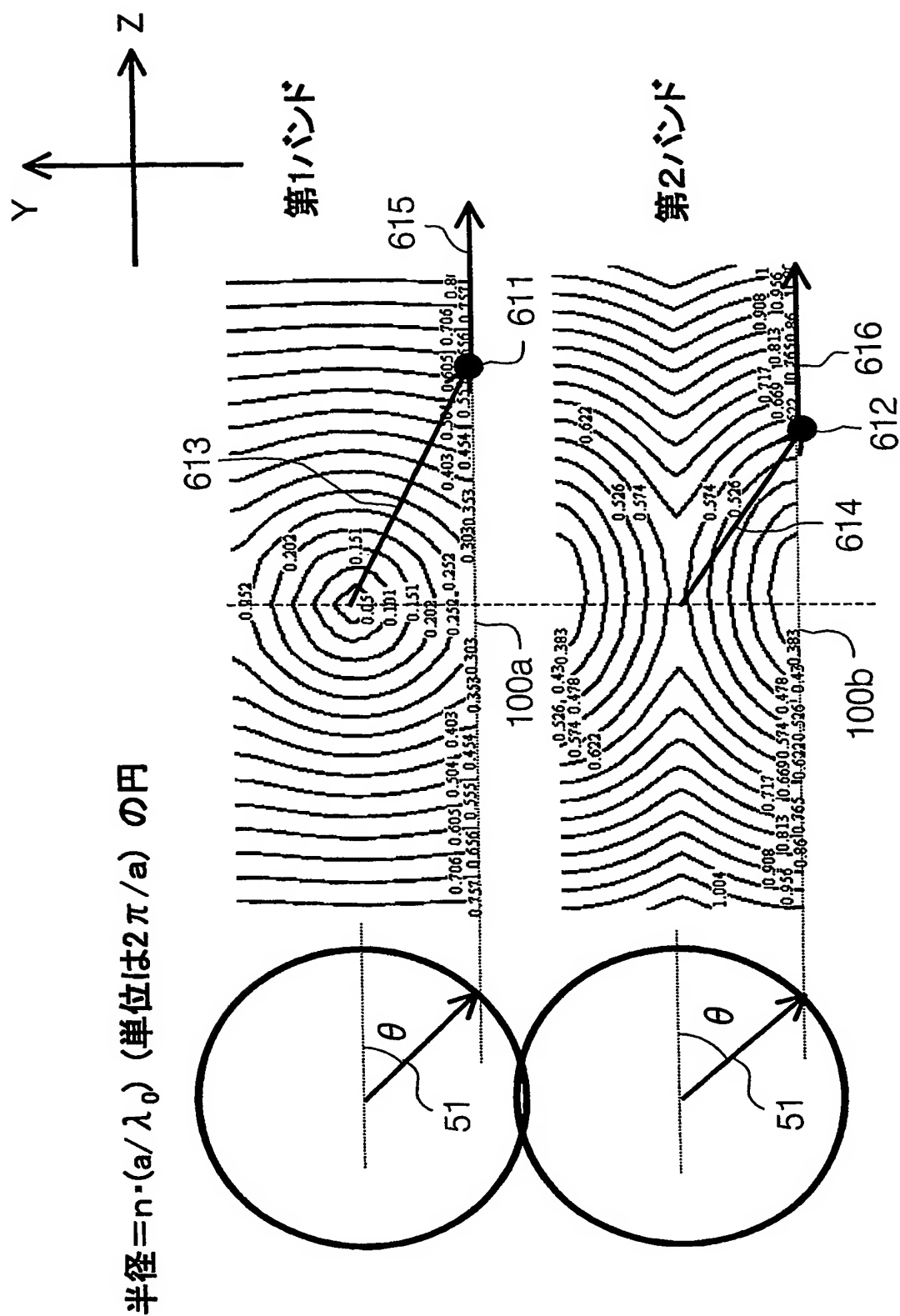
【図 4】



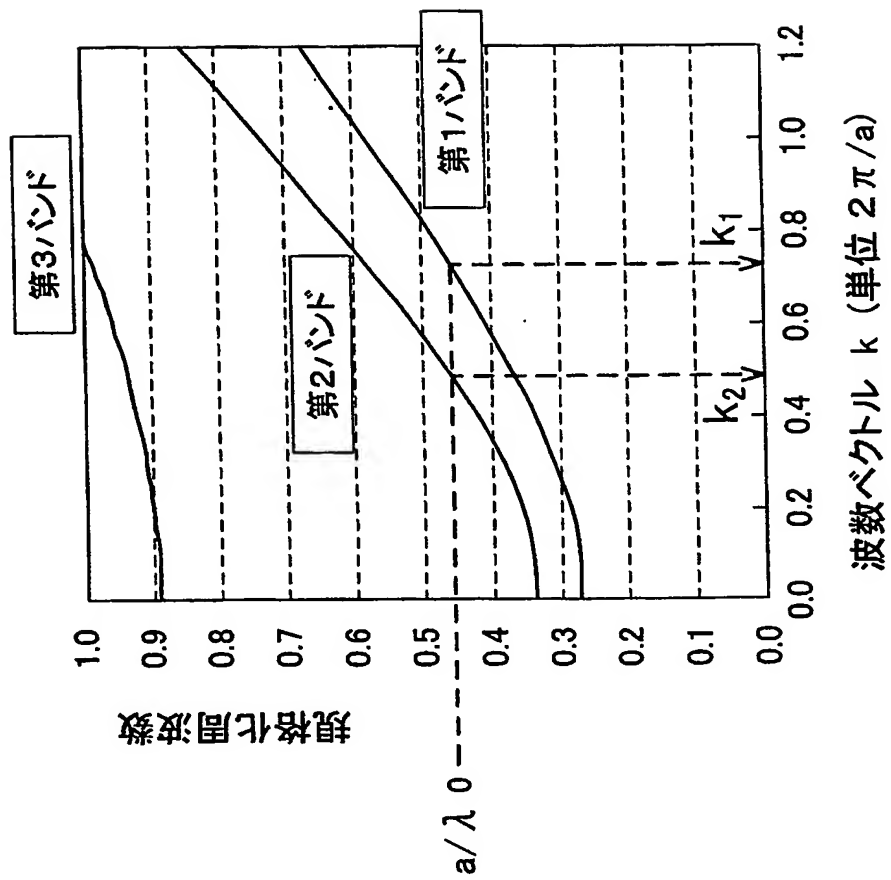
【図 5】



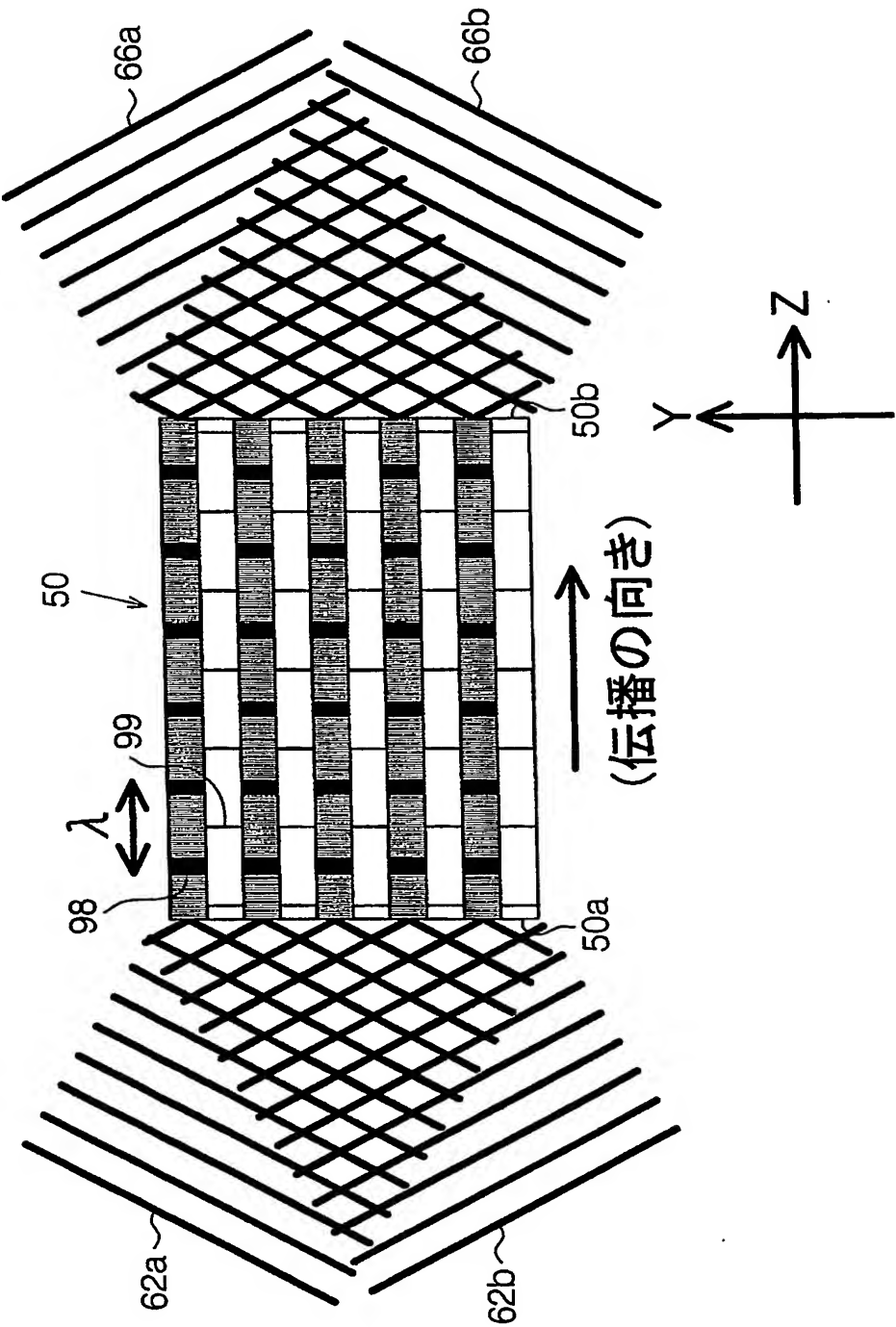
【圖 6】



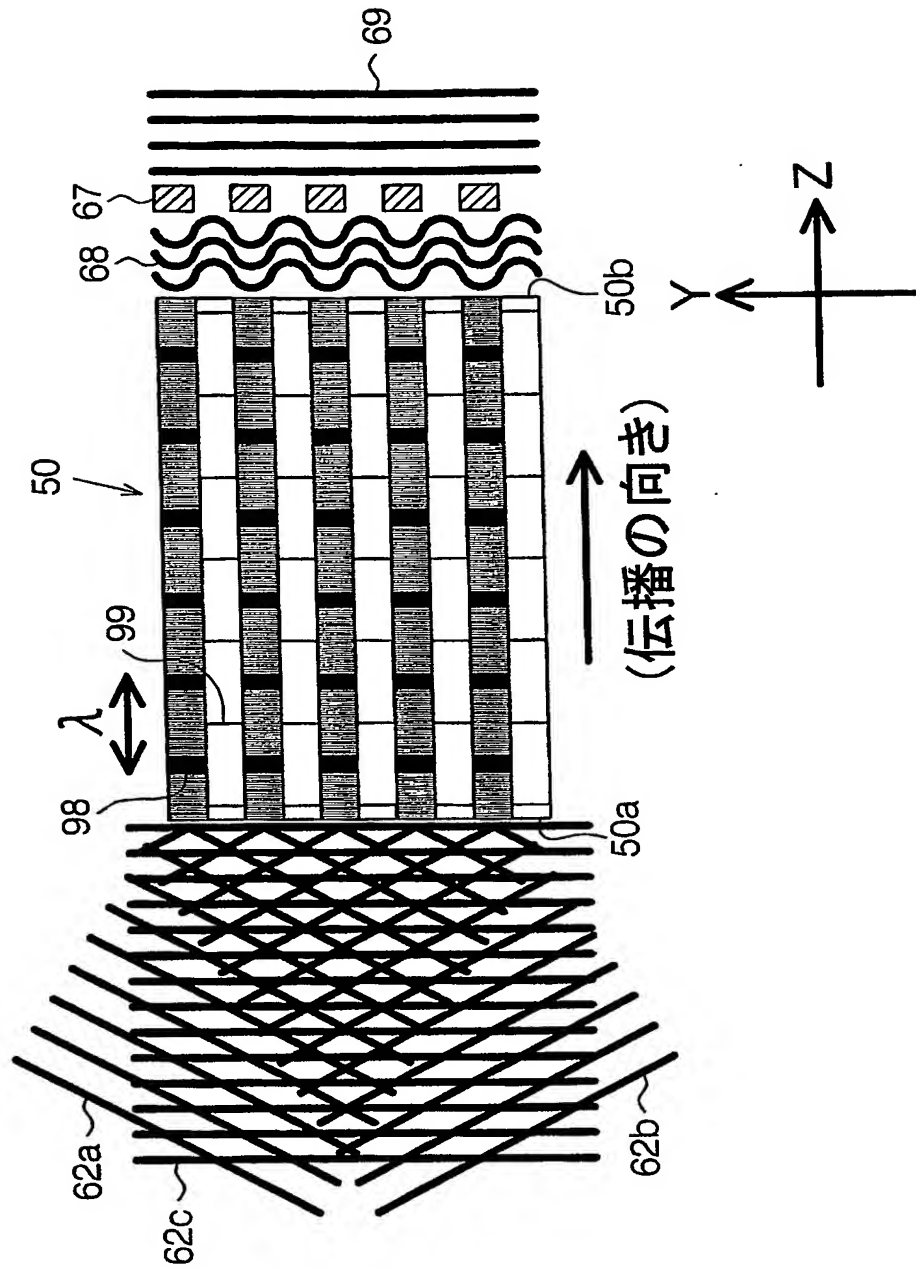
【図 7】



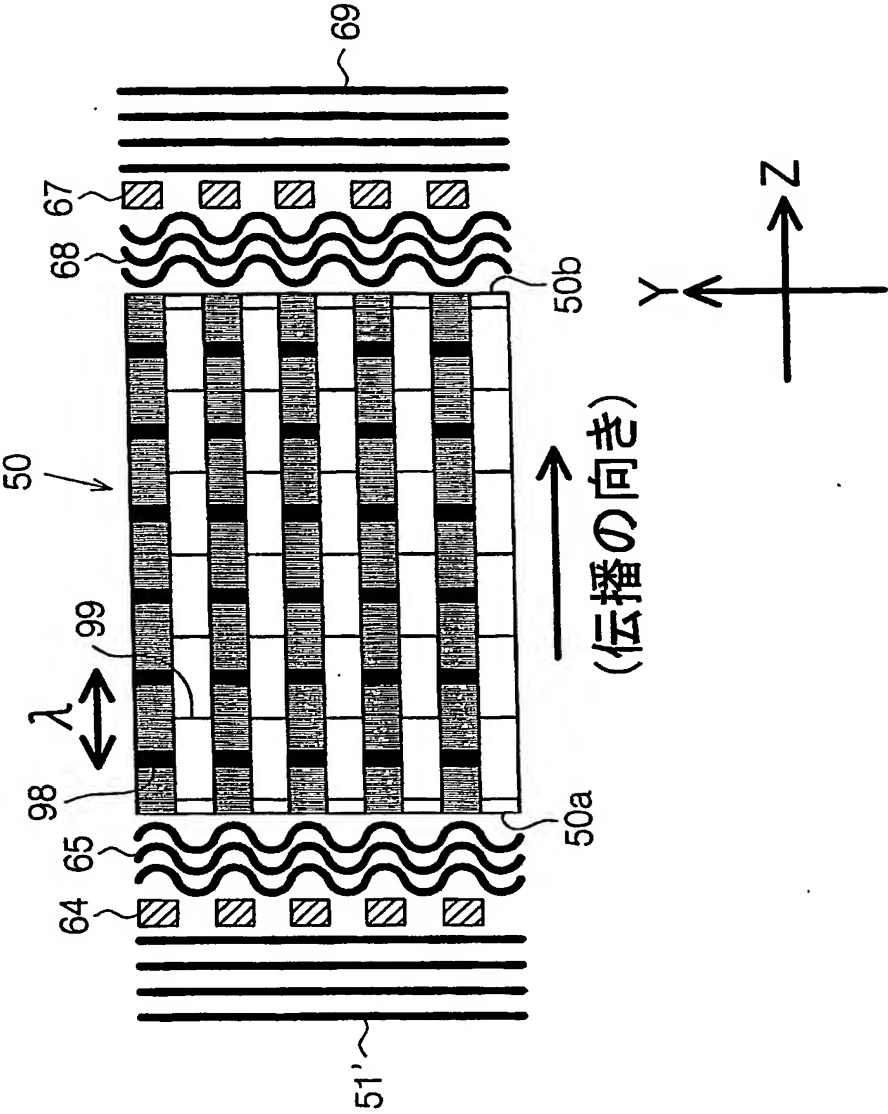
【図8】



【図 9】

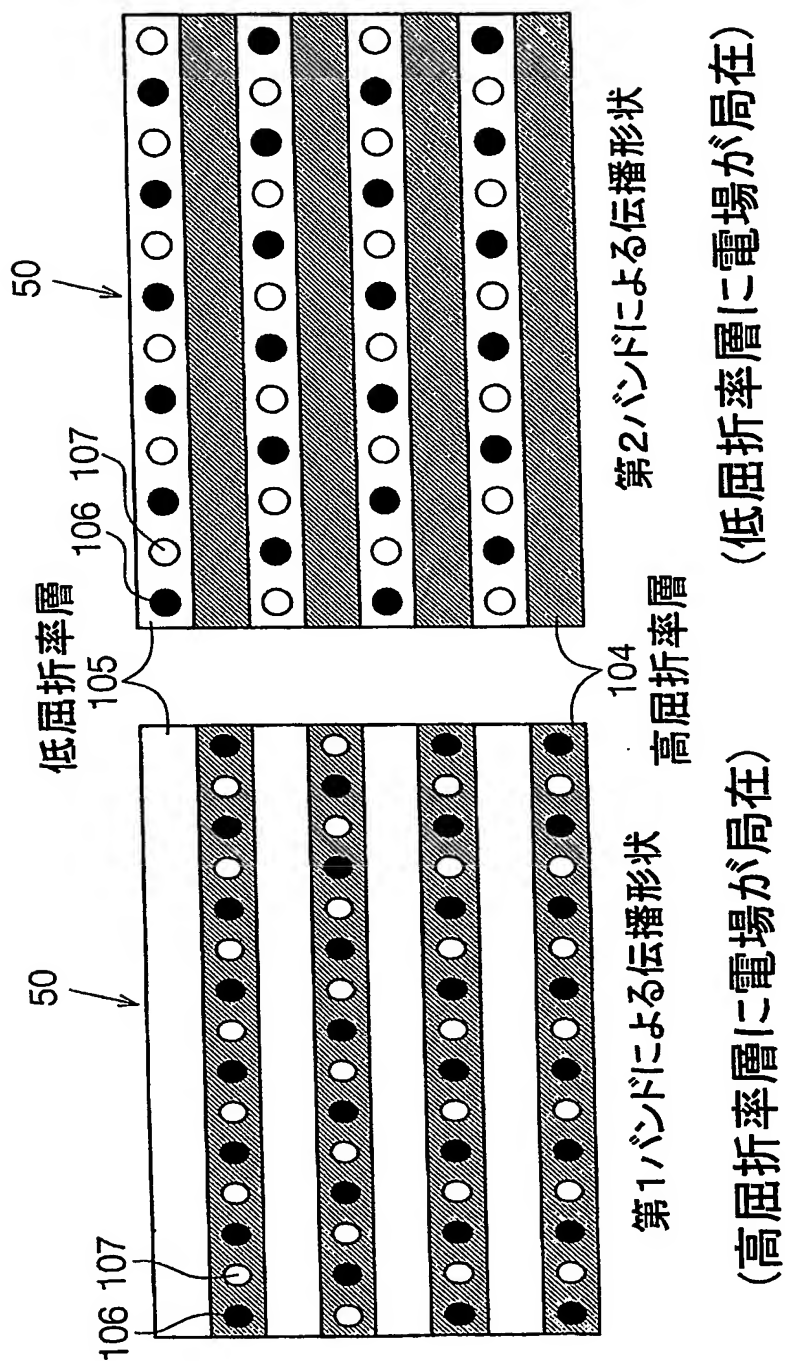


【図10】

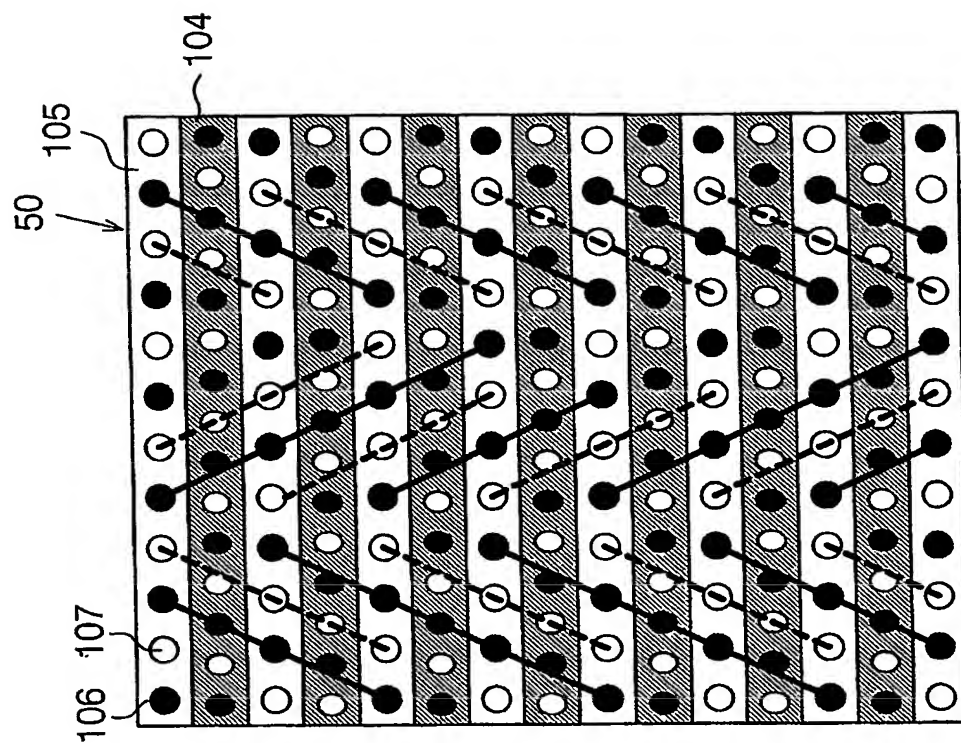




【図 11】

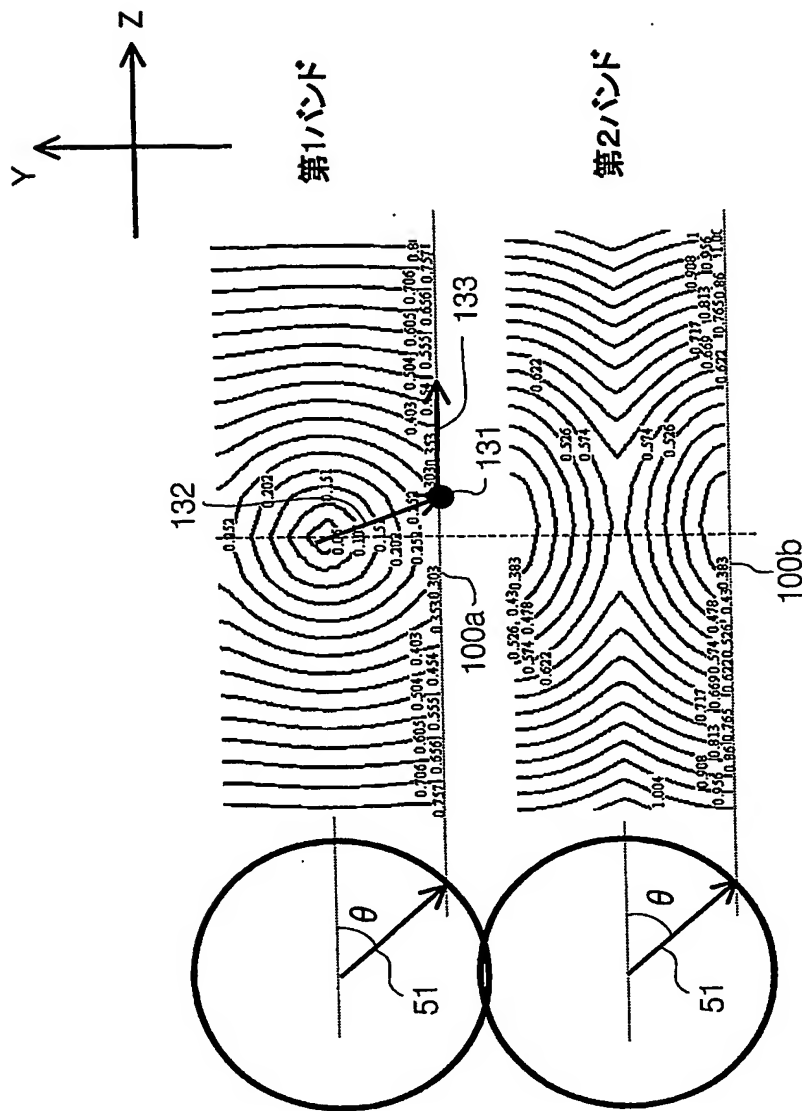


【図12】

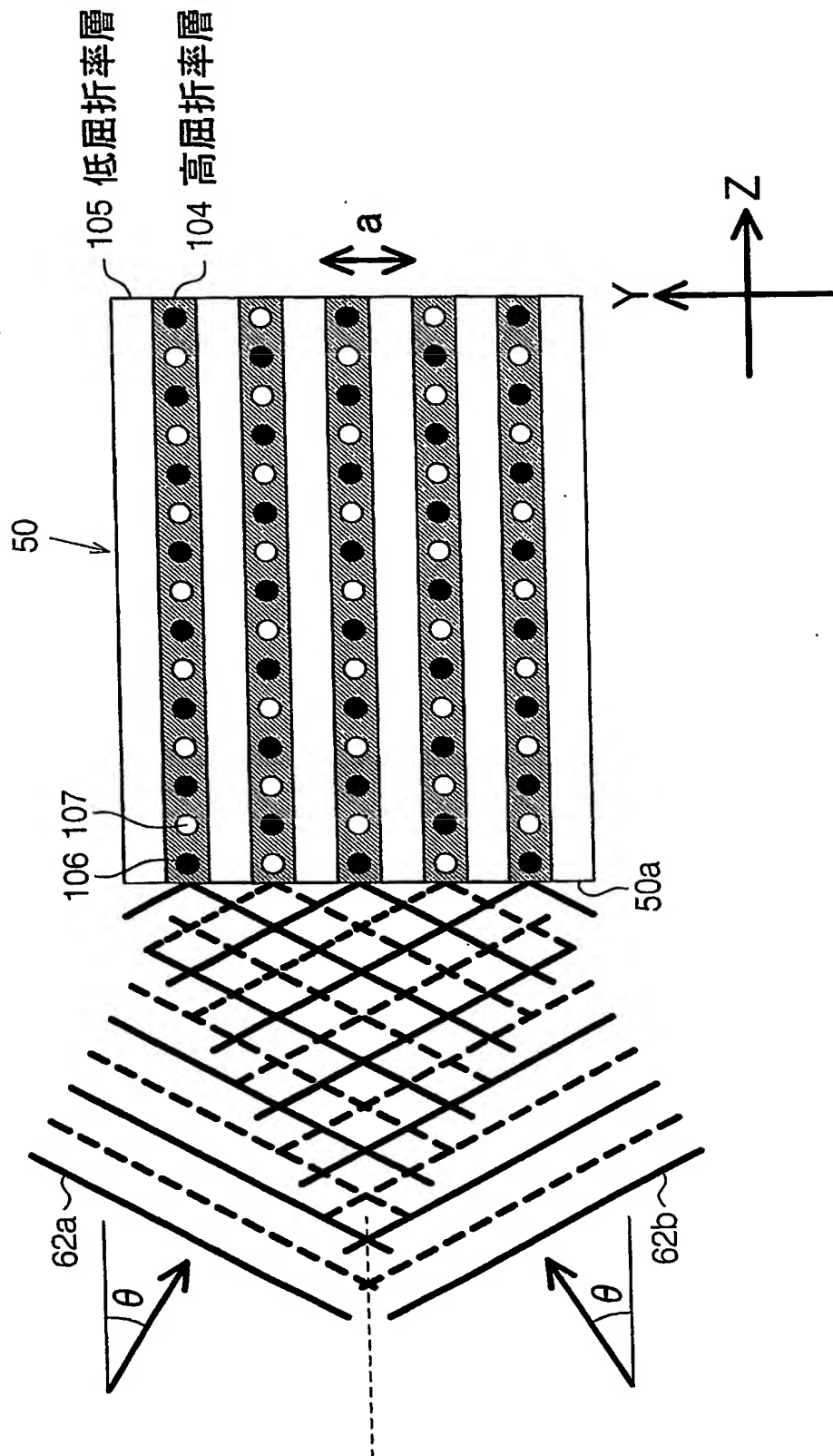


第1バンド + 第2バンドによる伝播形状

【図 13】

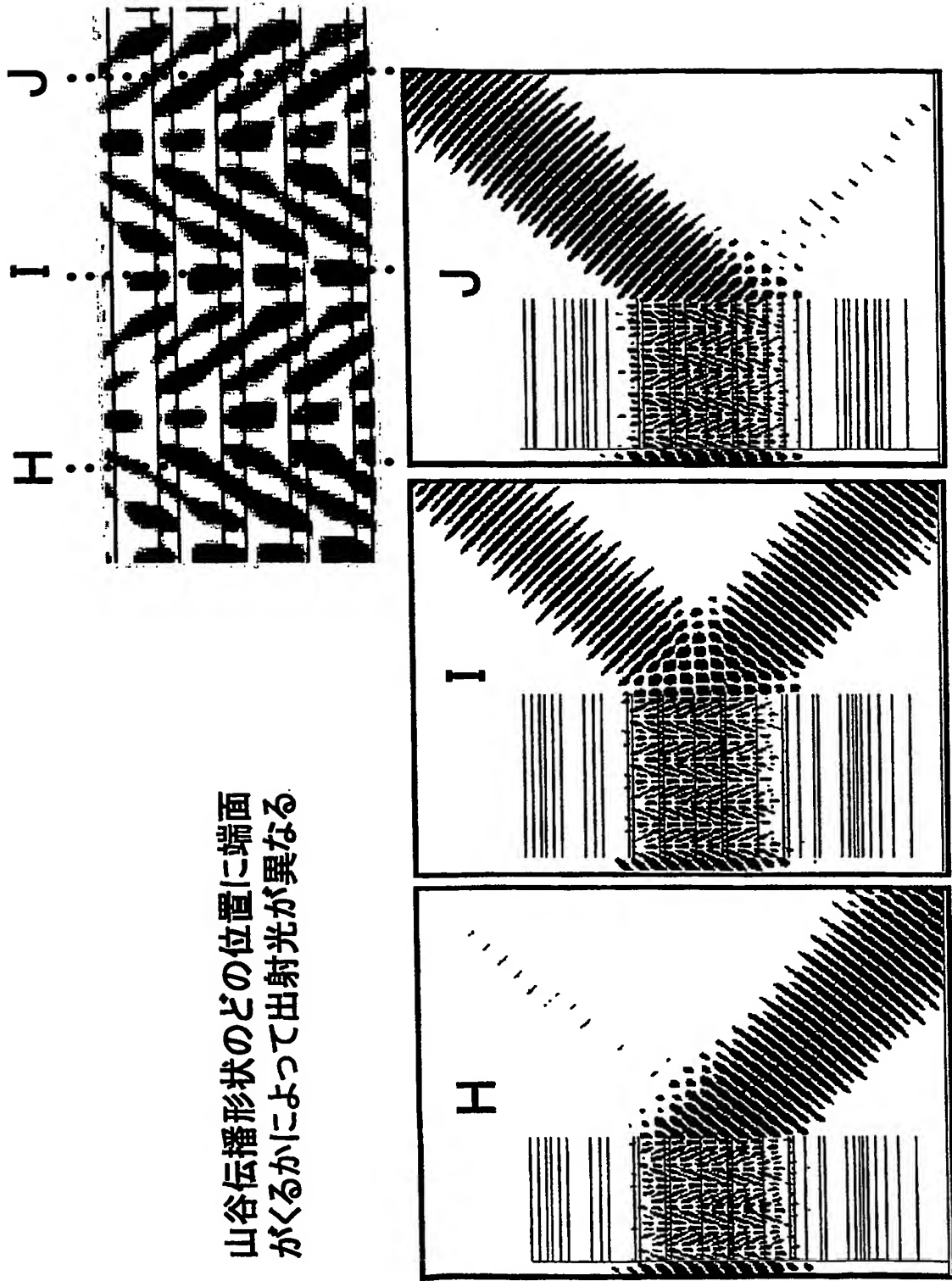


【図 14】



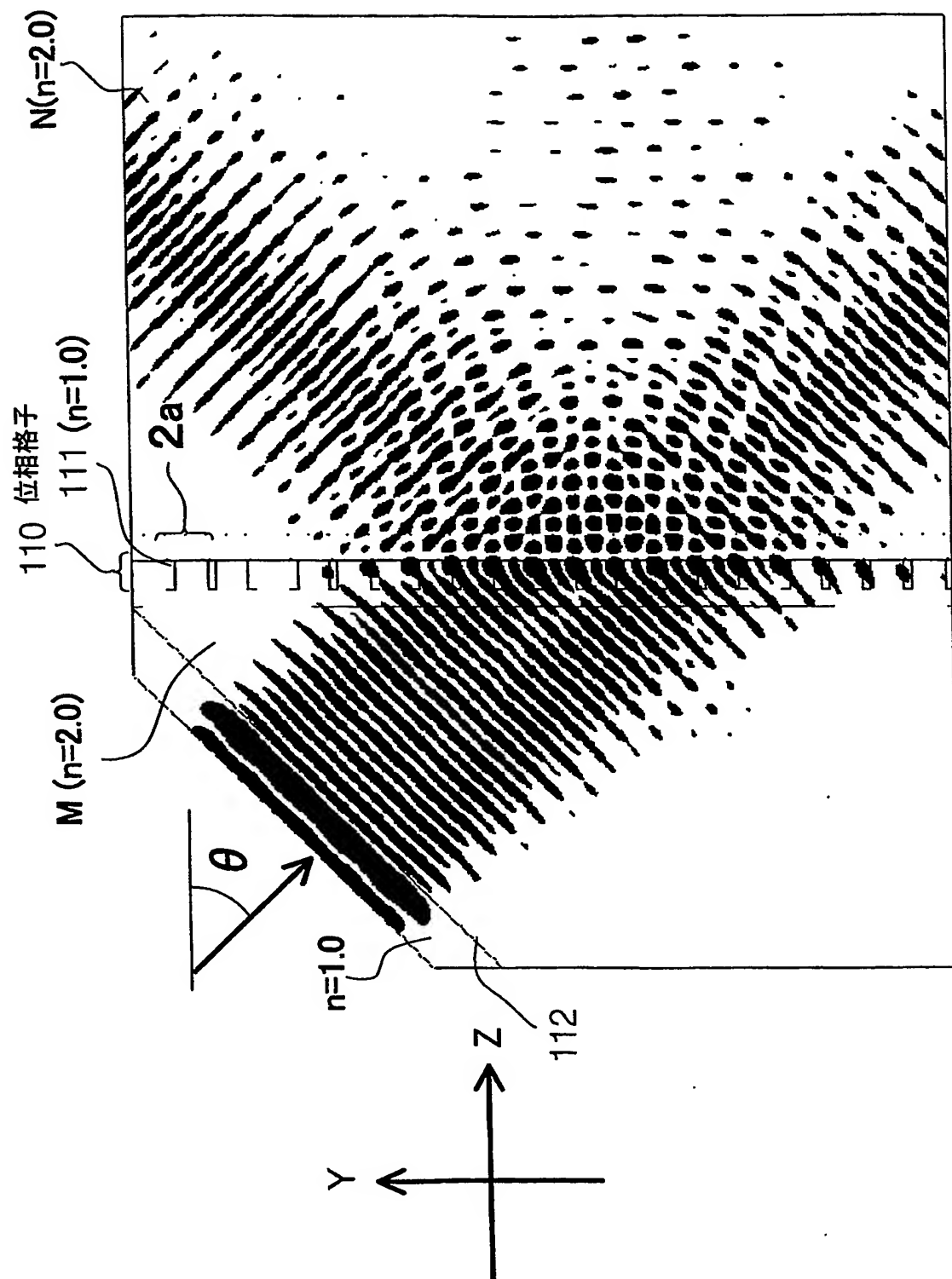


【図 16】



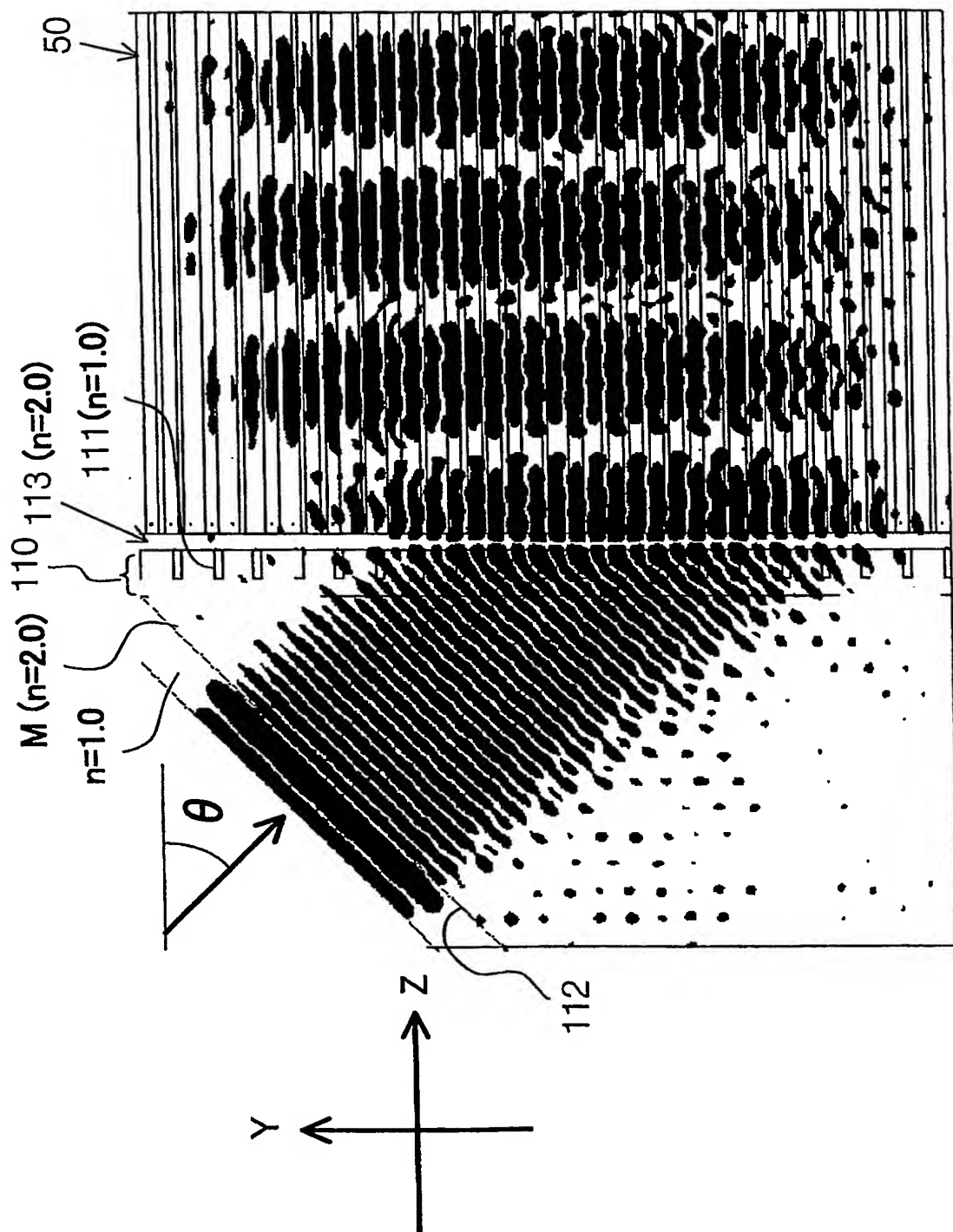
山谷伝播形状のどの位置に端面  
がくるかによって出射光が異なる

【図 17】



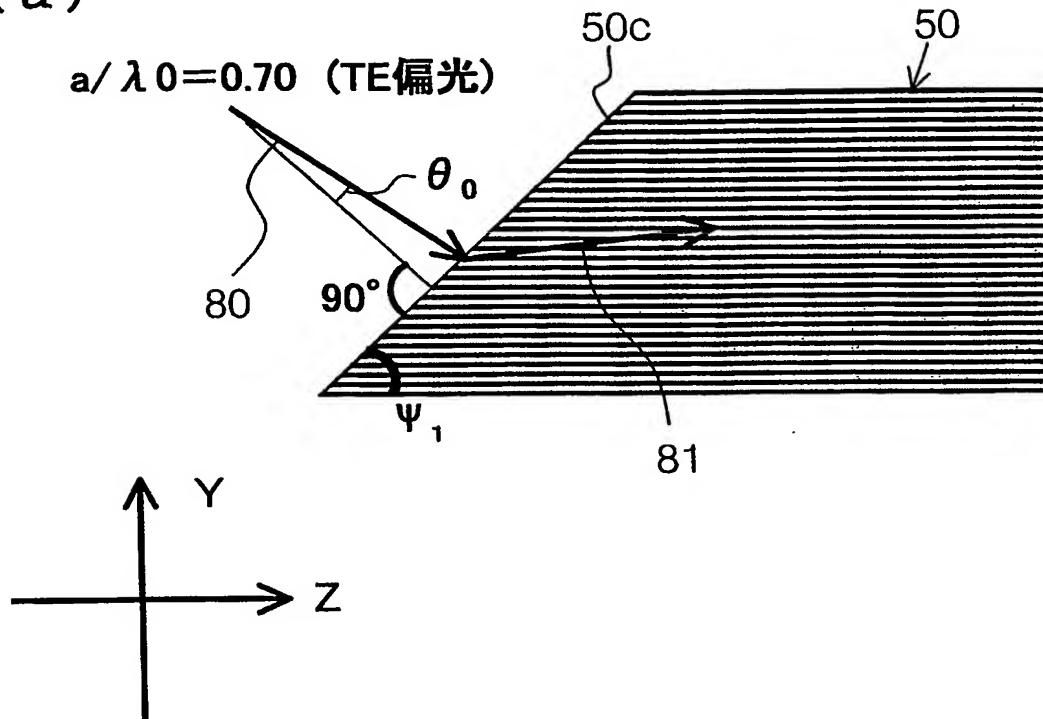


【図 18】

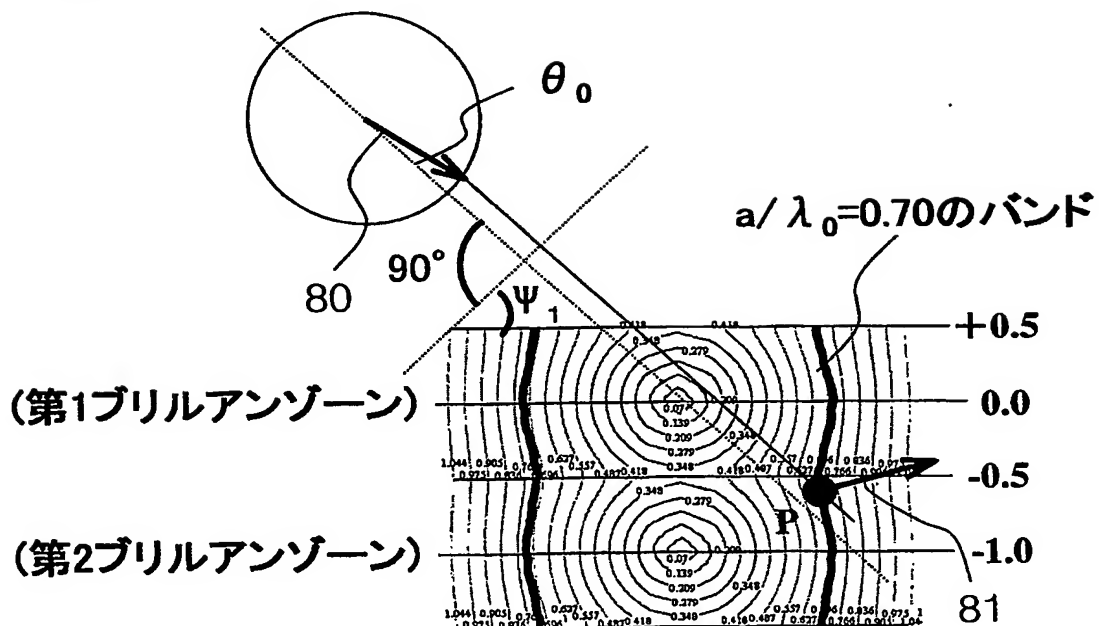


【図 19】

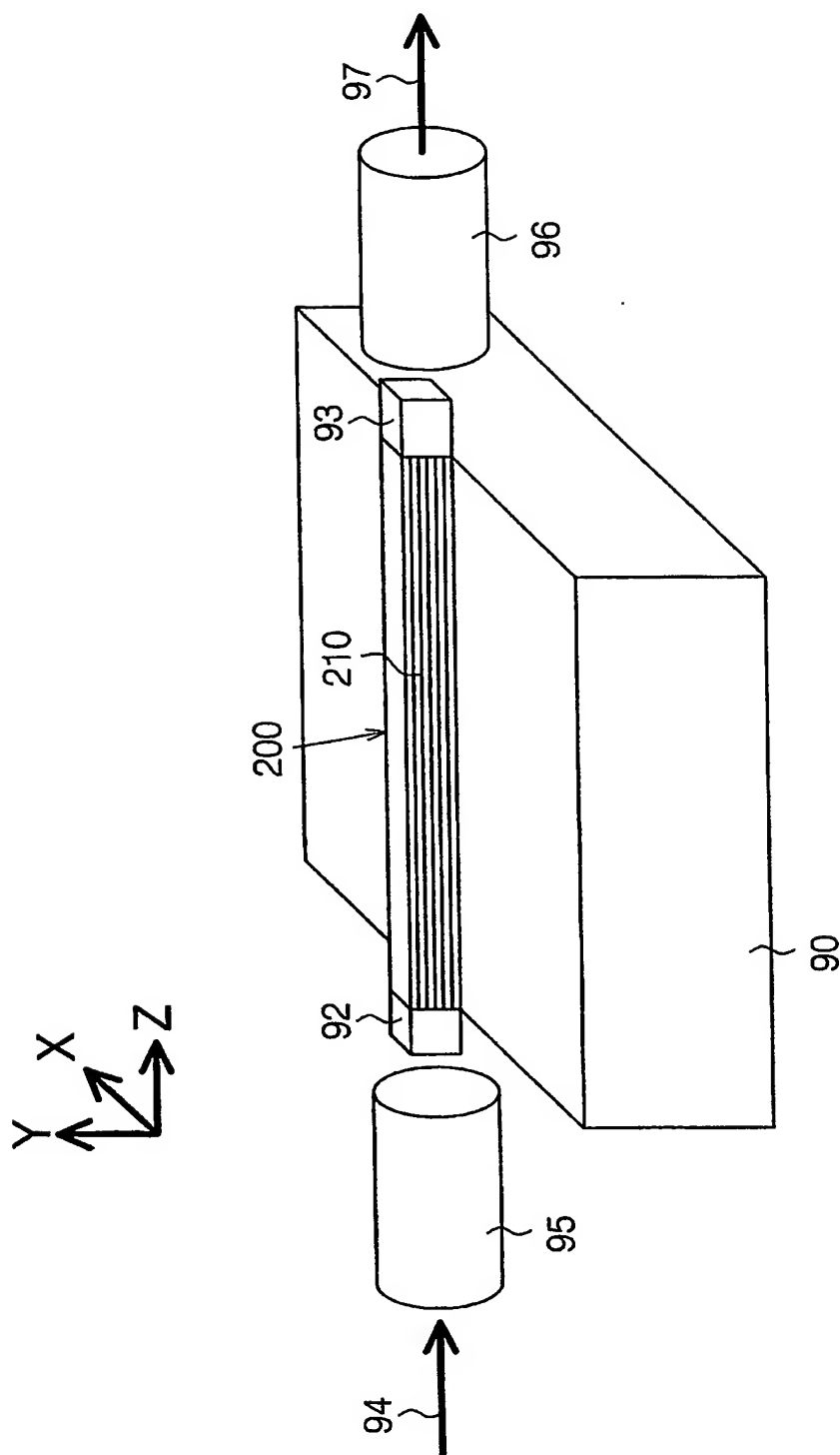
(a)



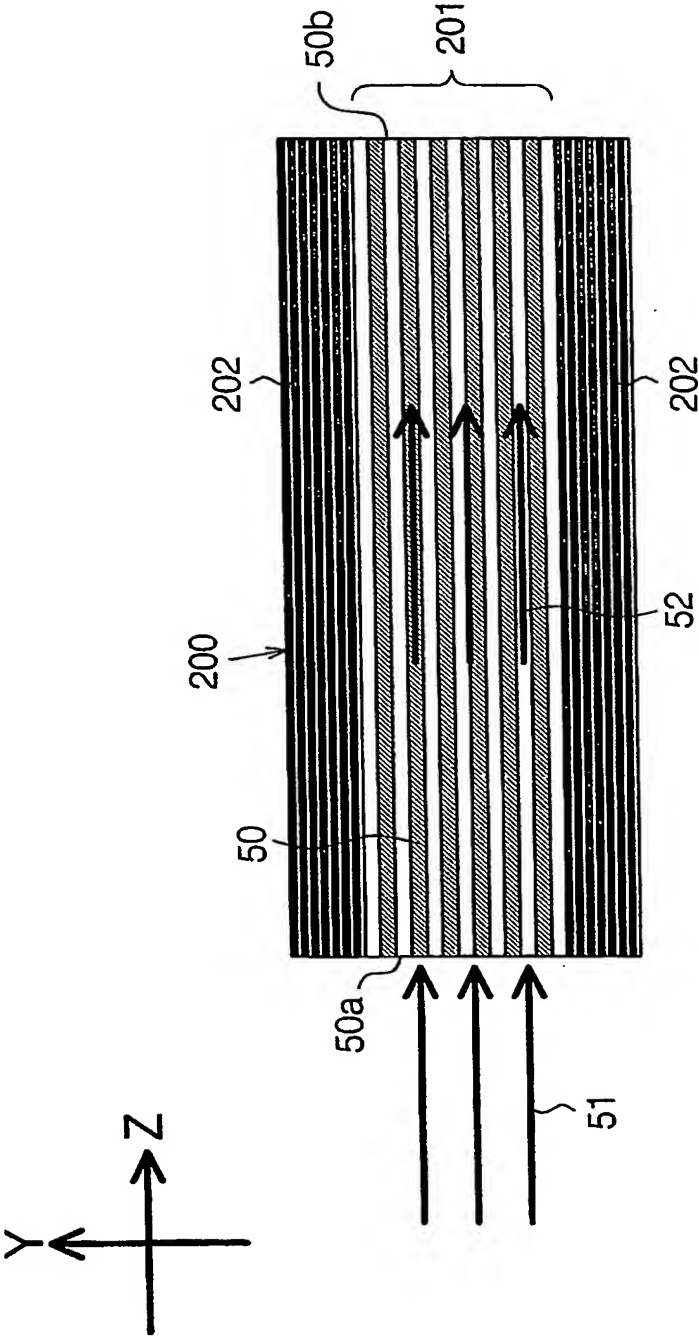
(b) (半径0.70の円)



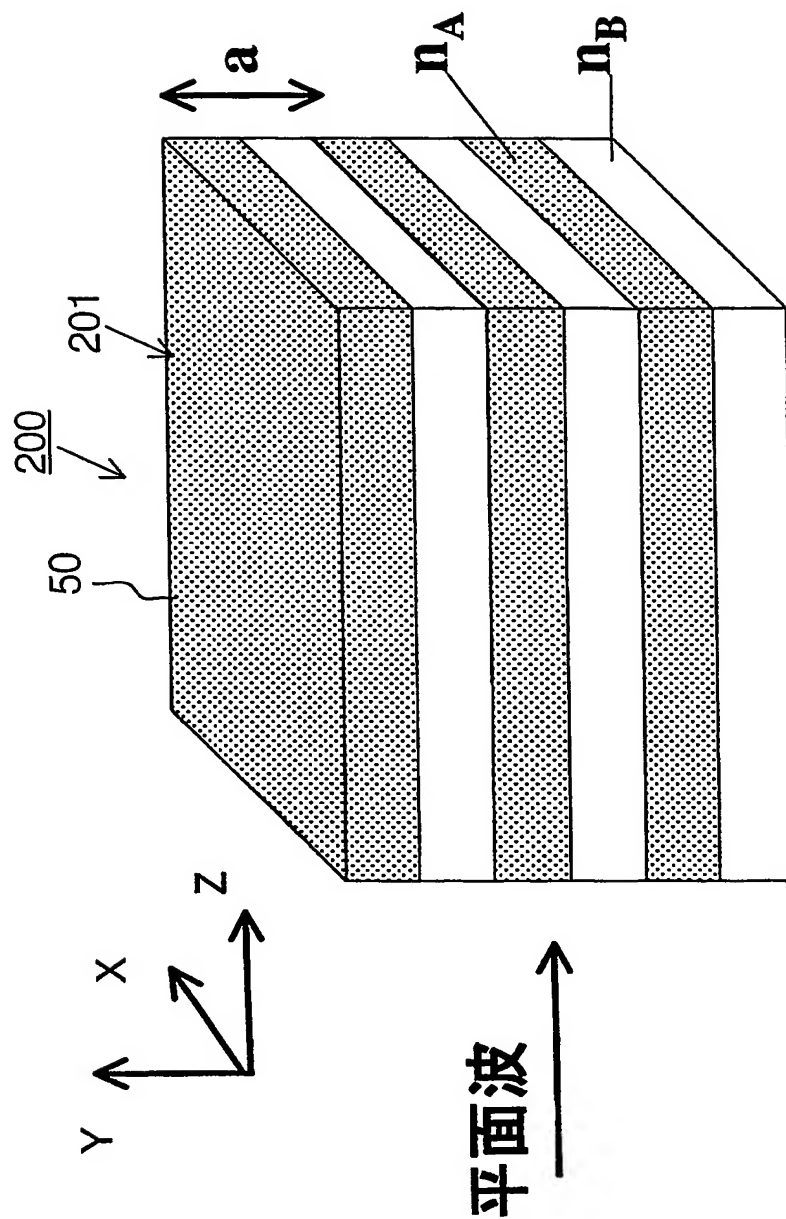
【図 20】



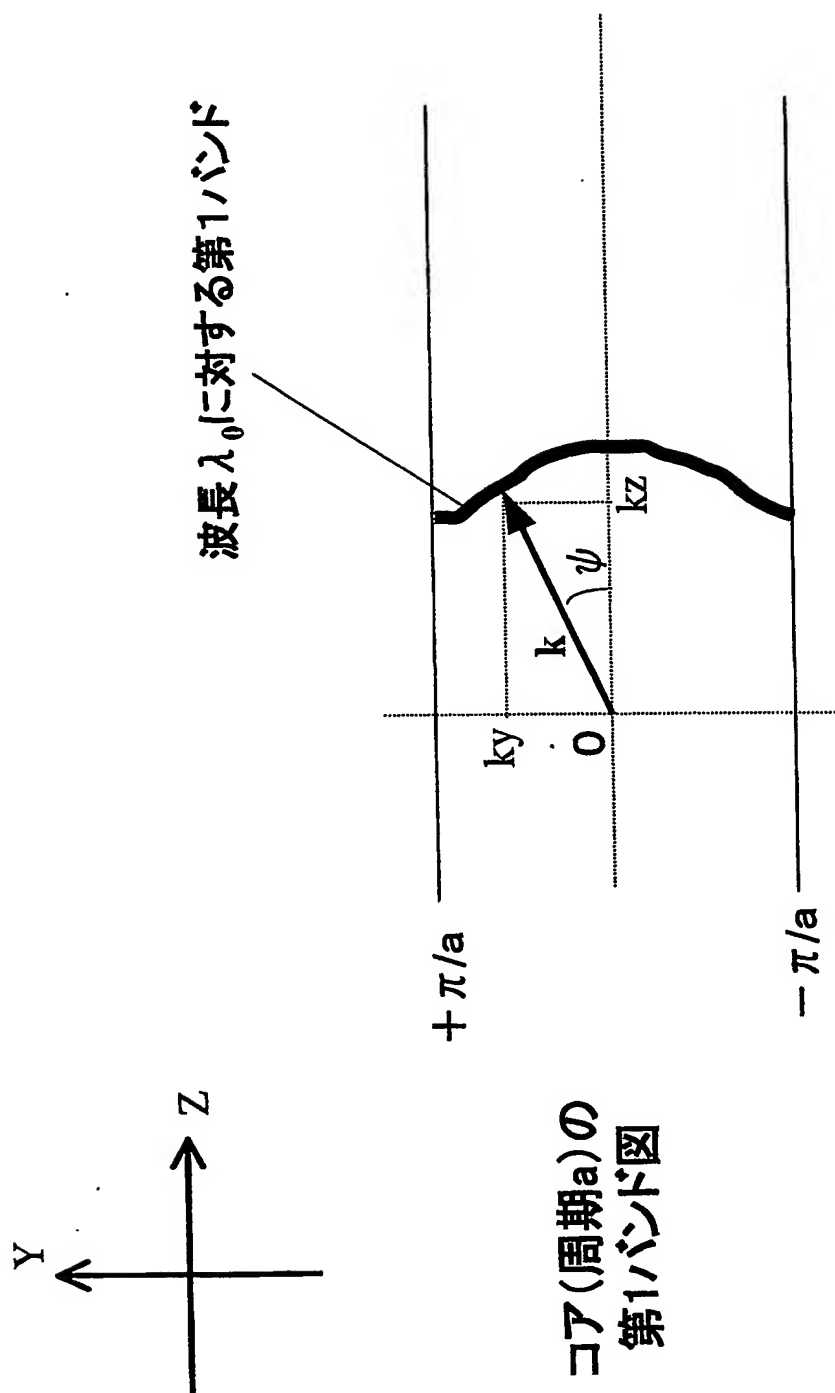
【図 21】



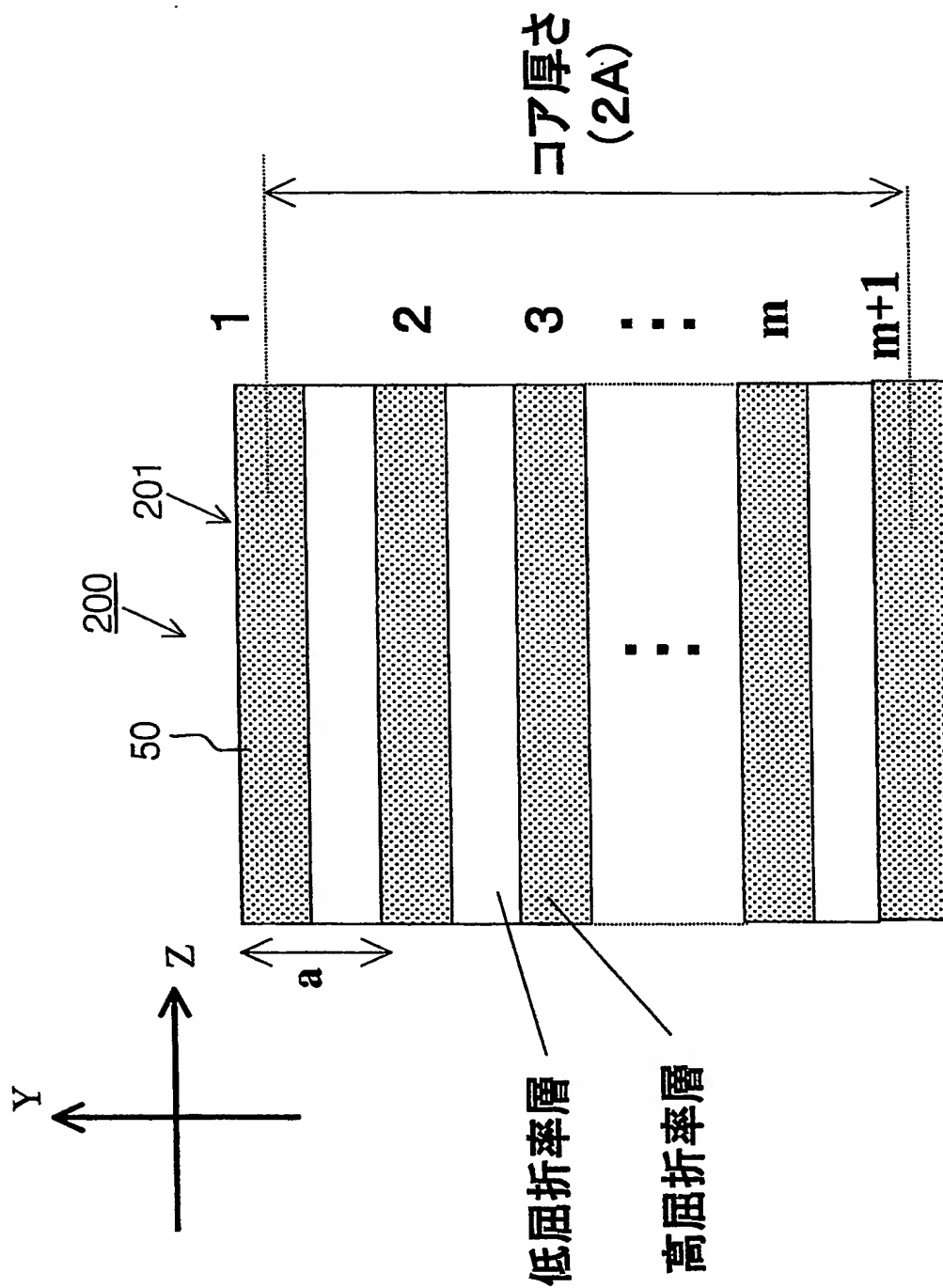
【図 22】



【図 23】

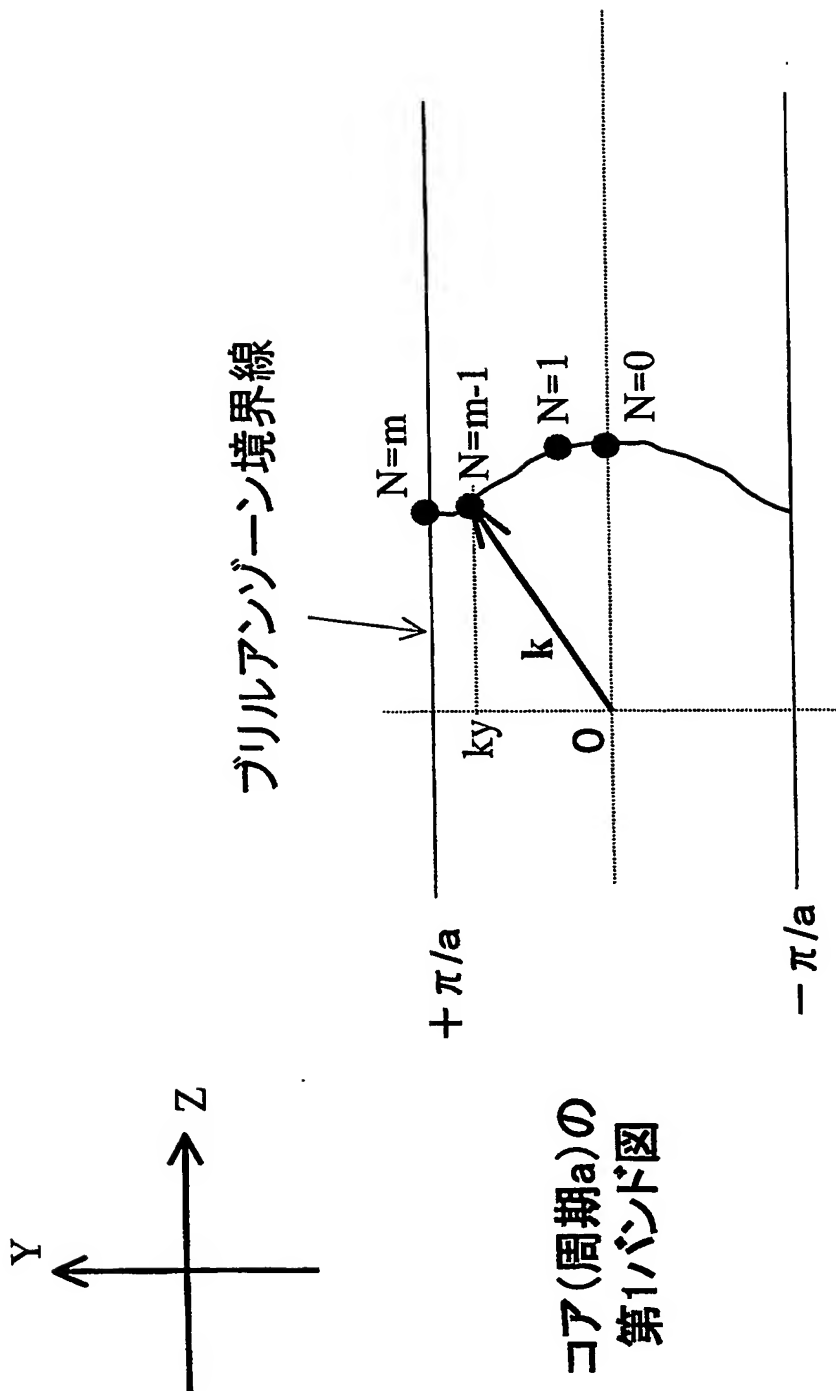


【図 24】

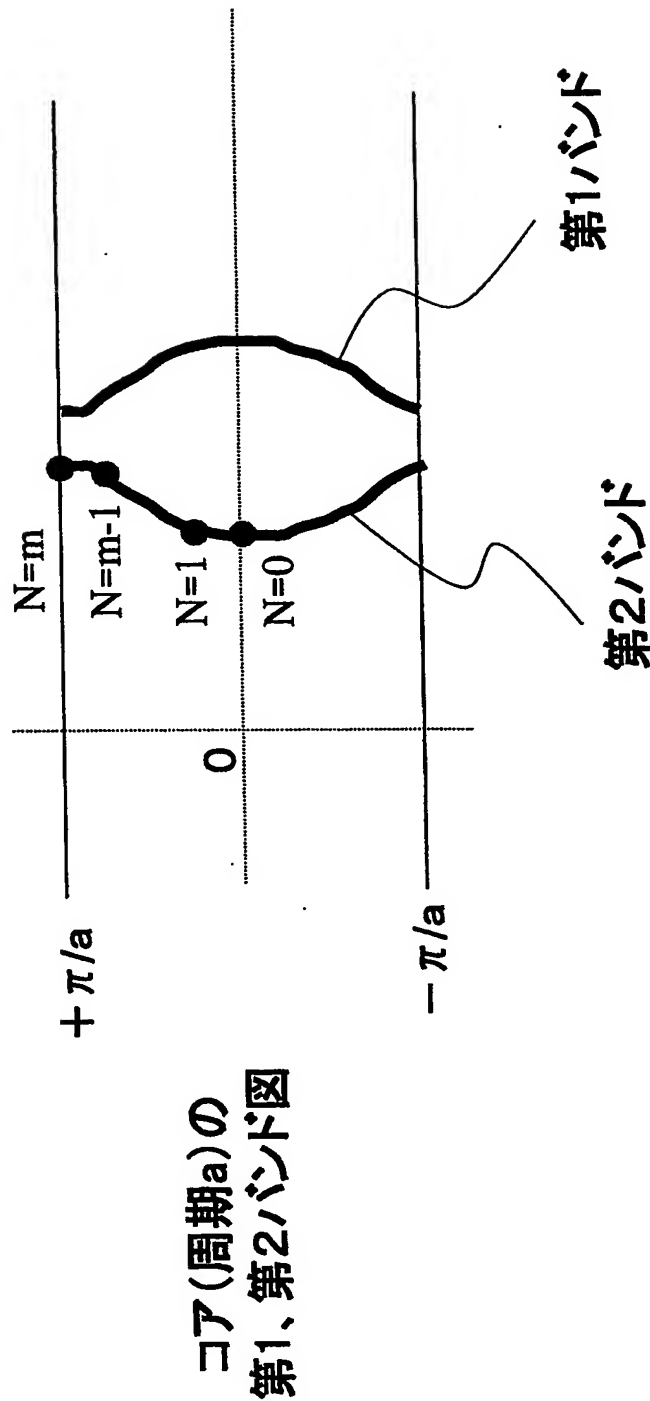




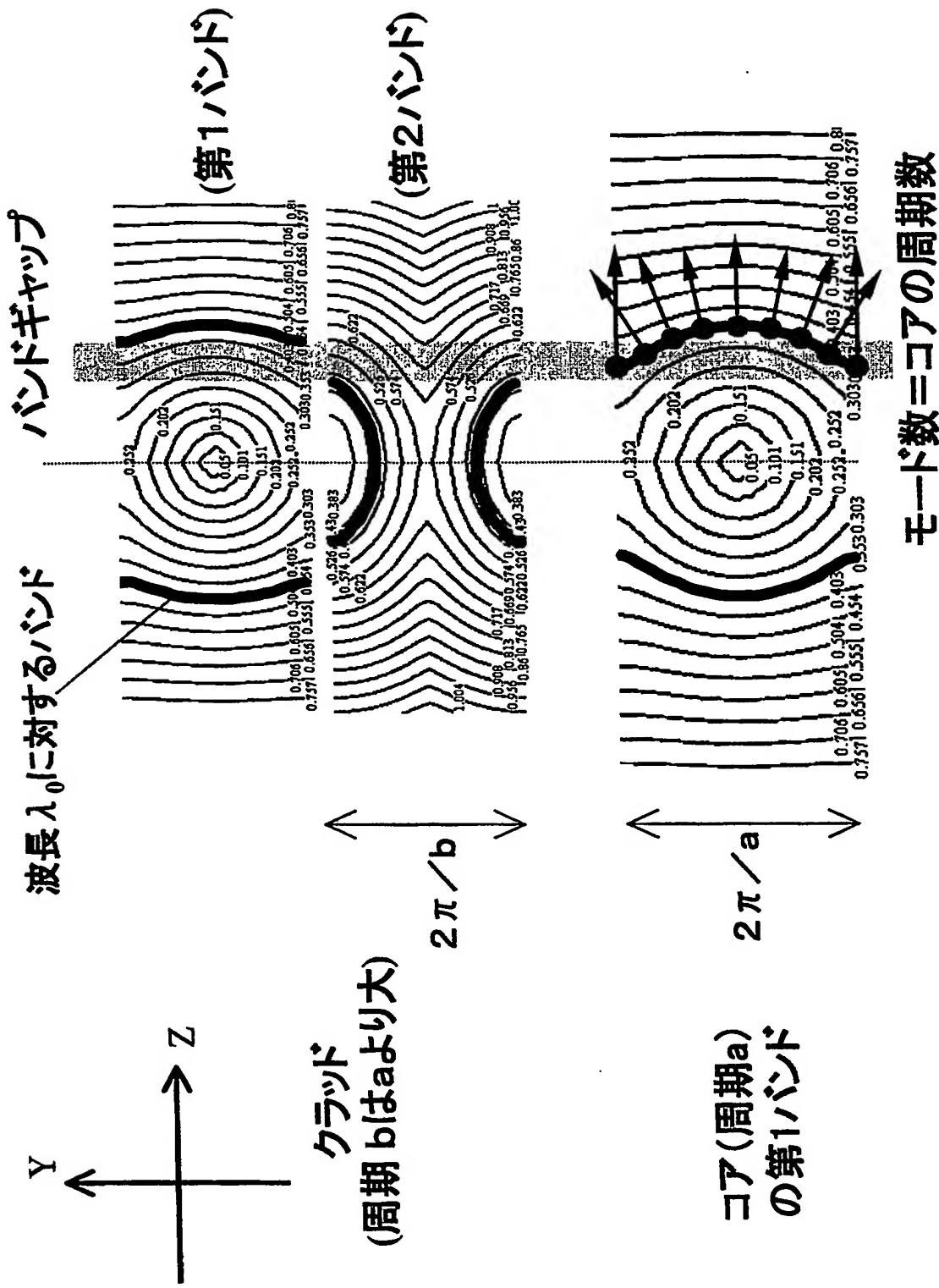
【図 25】



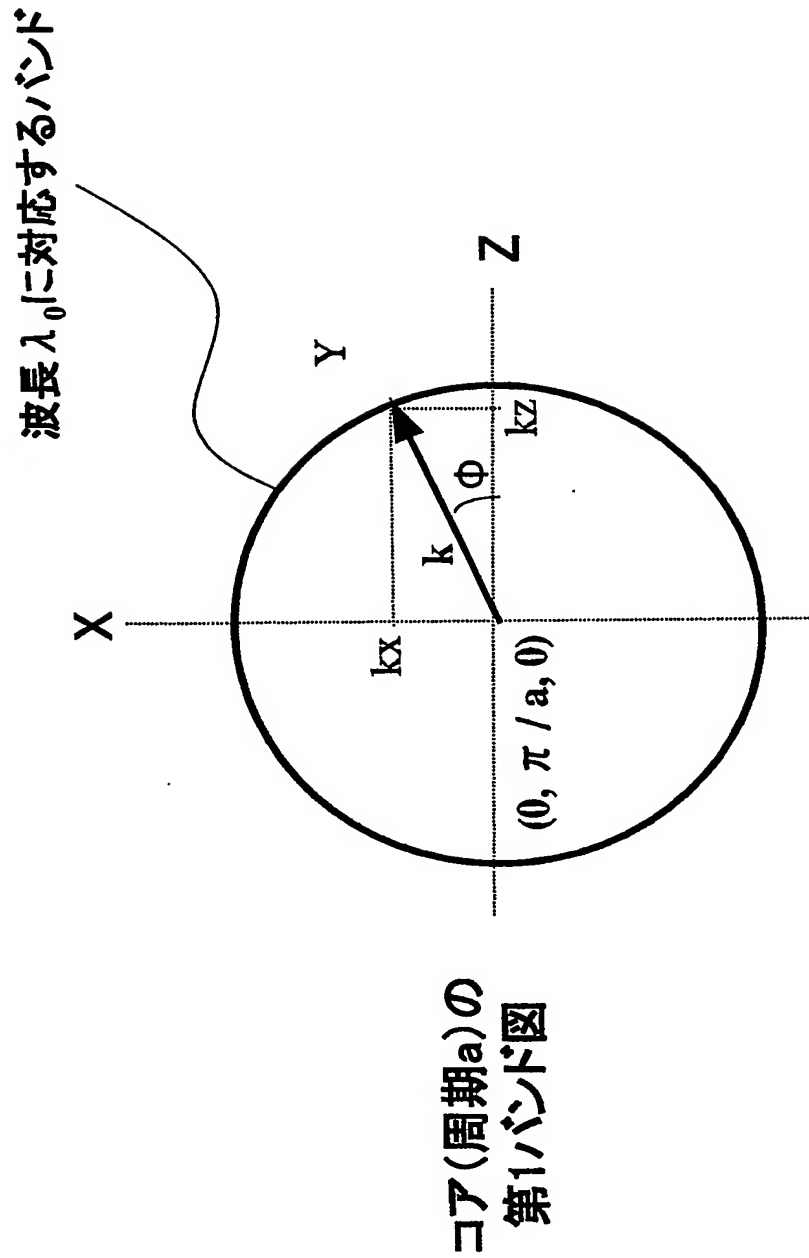
【図 26】



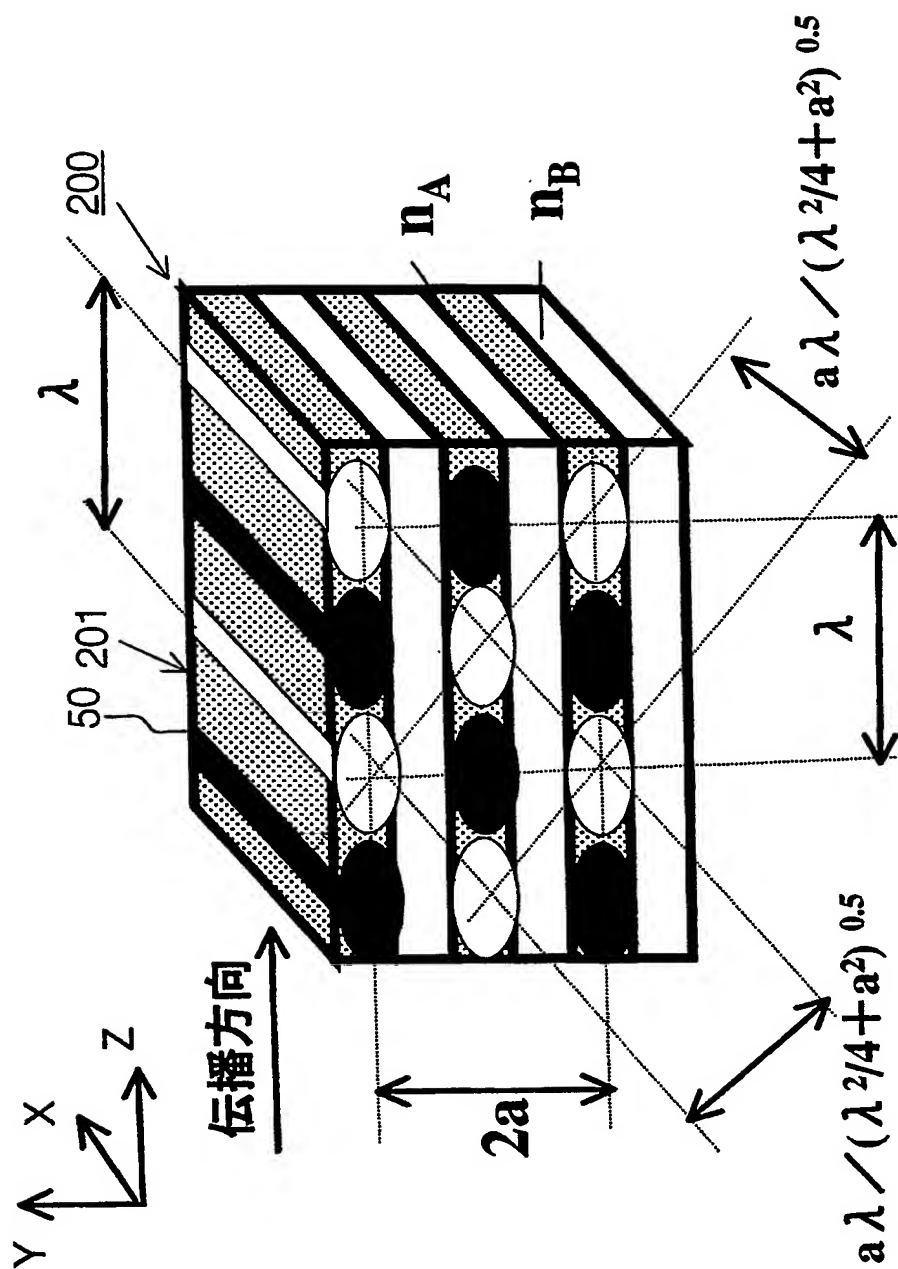
【図 27】



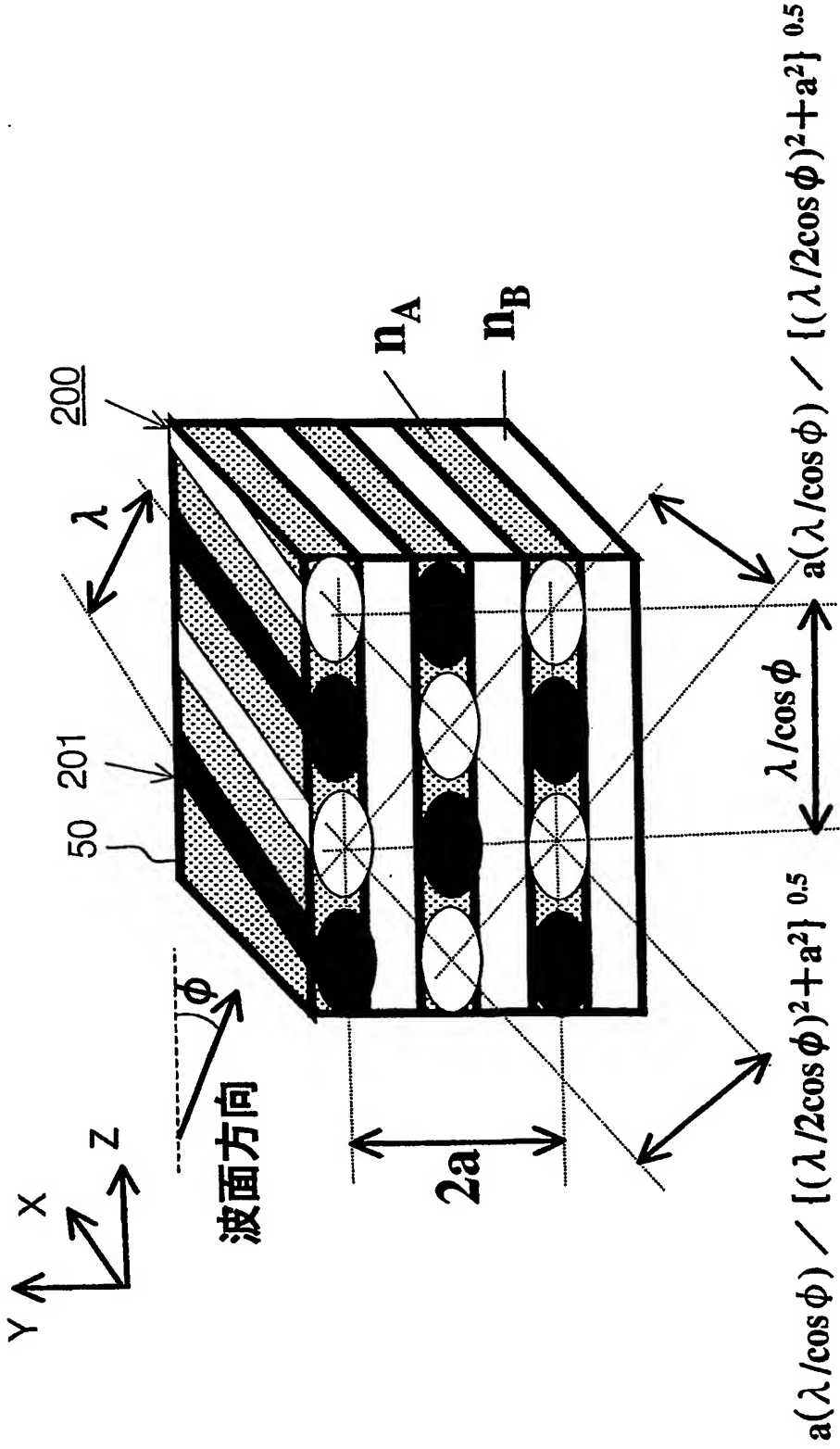
【図 28】



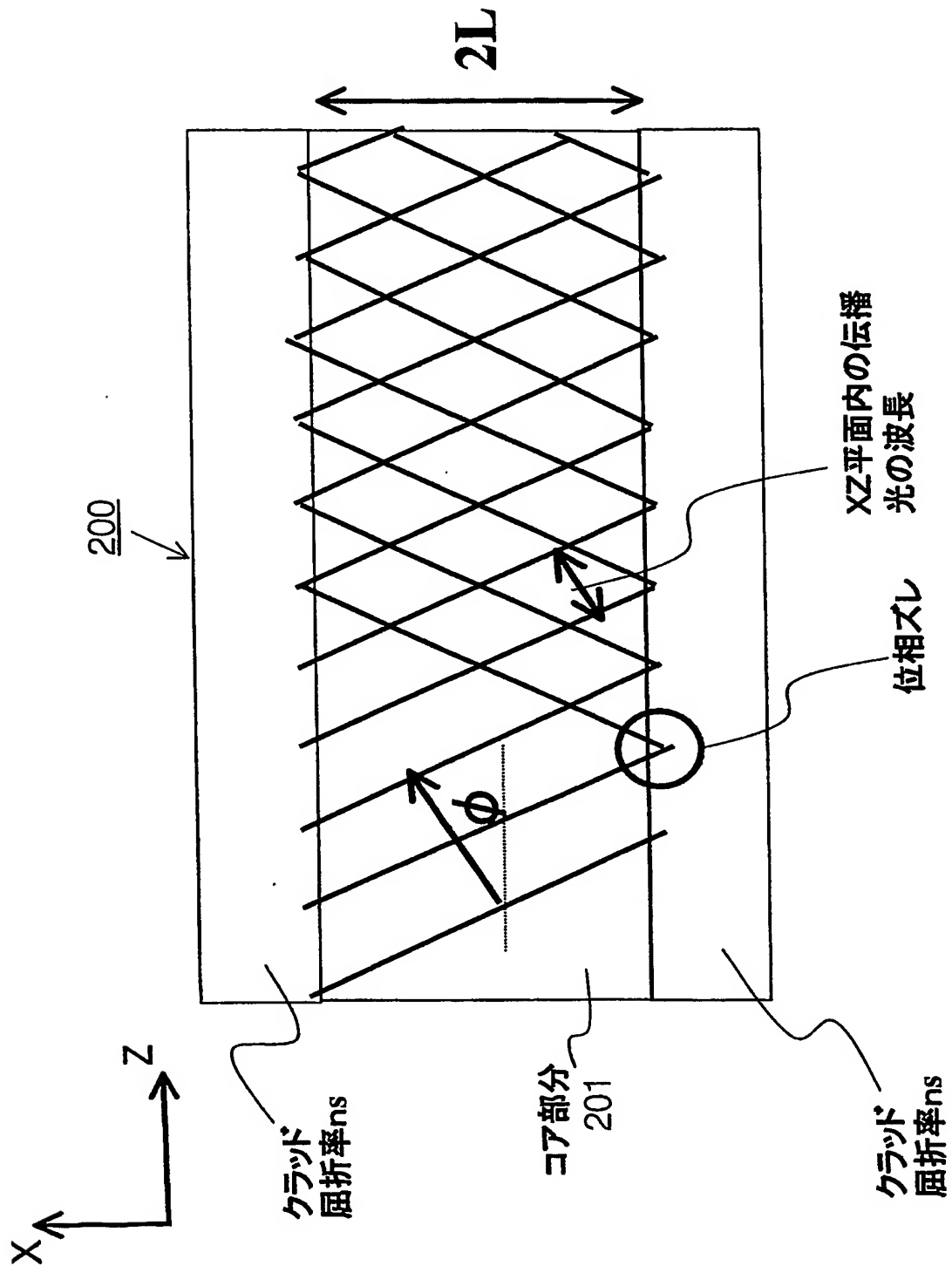
【图 29】



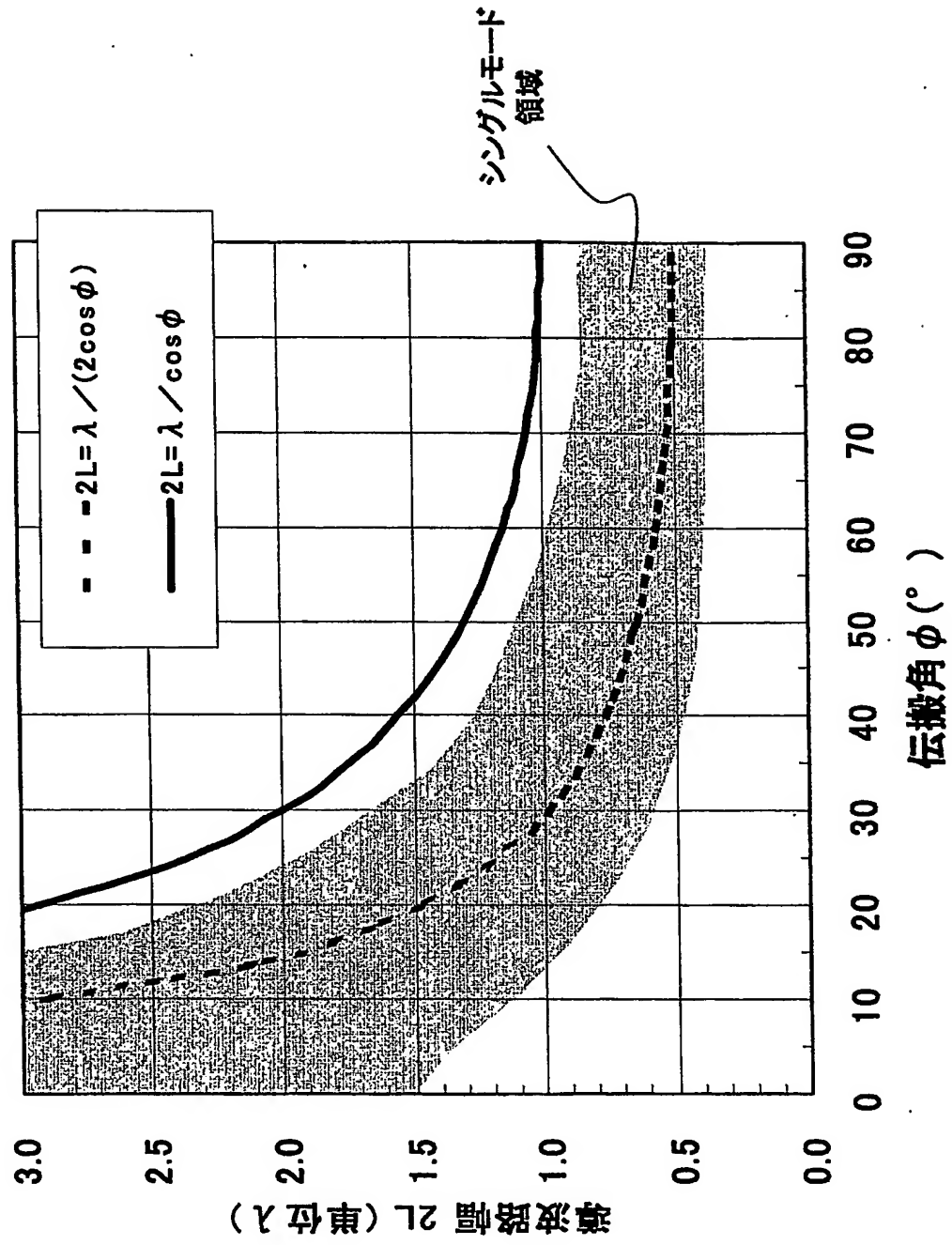
【図 30】



【図 31】

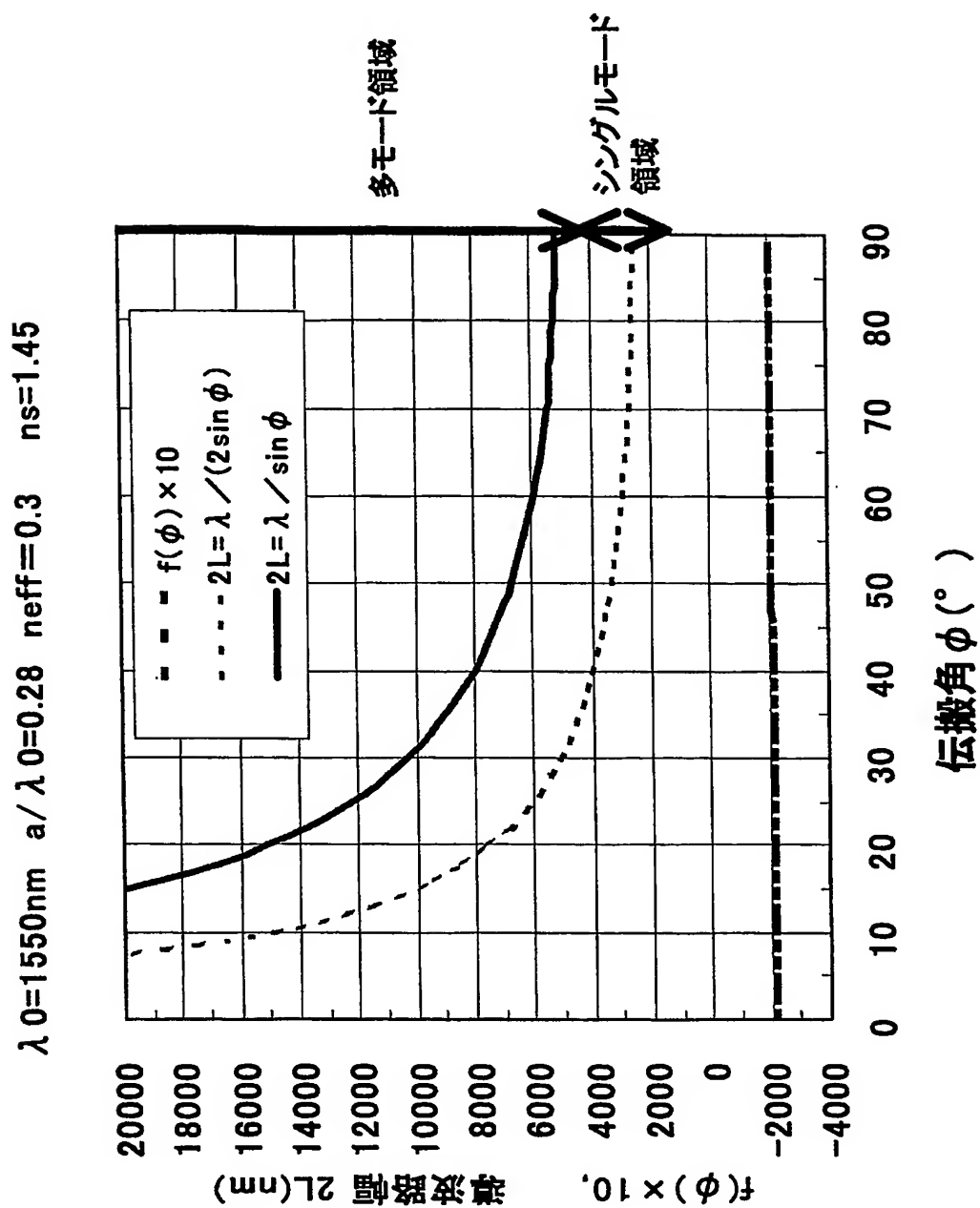


【図 32】

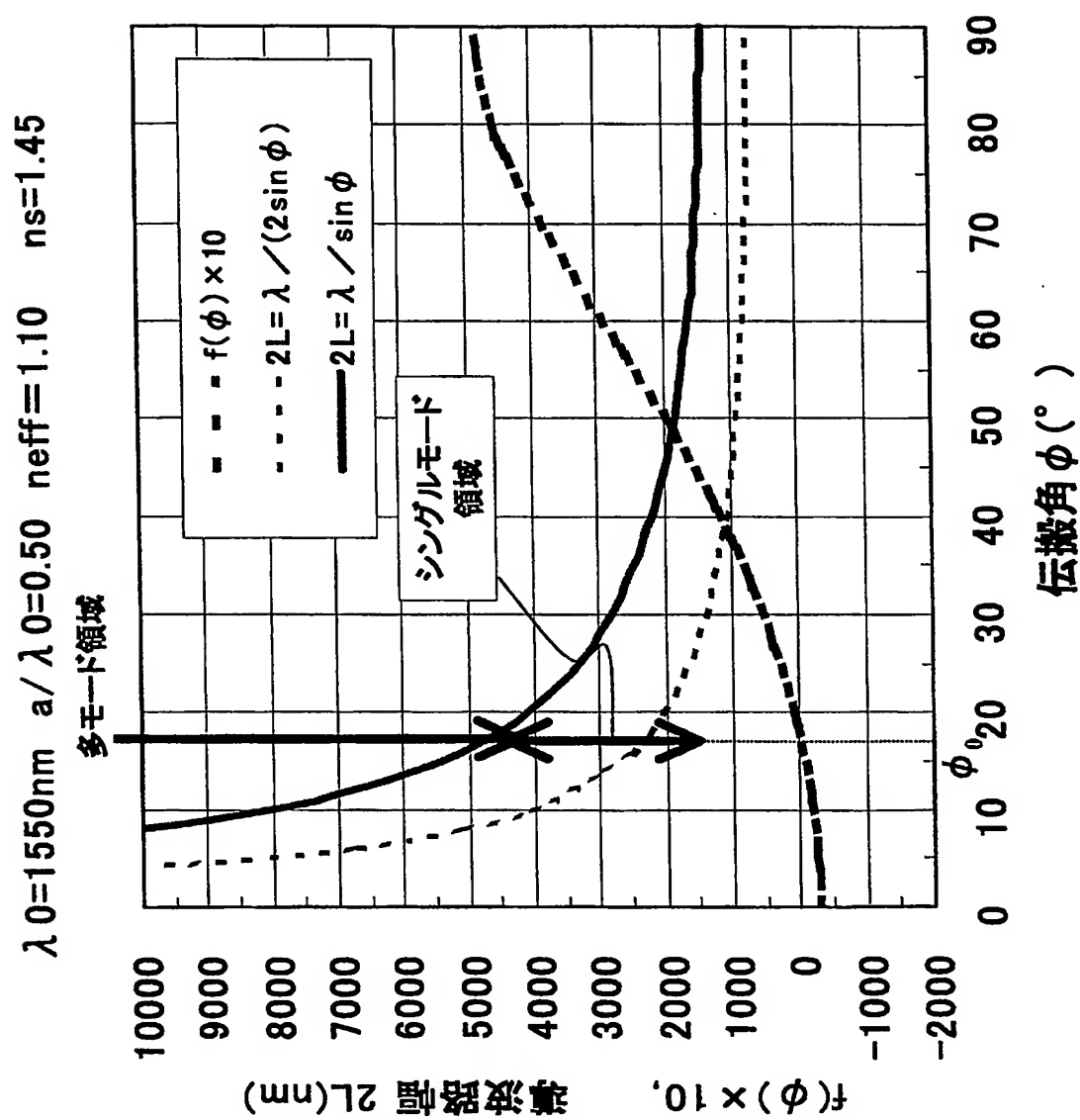




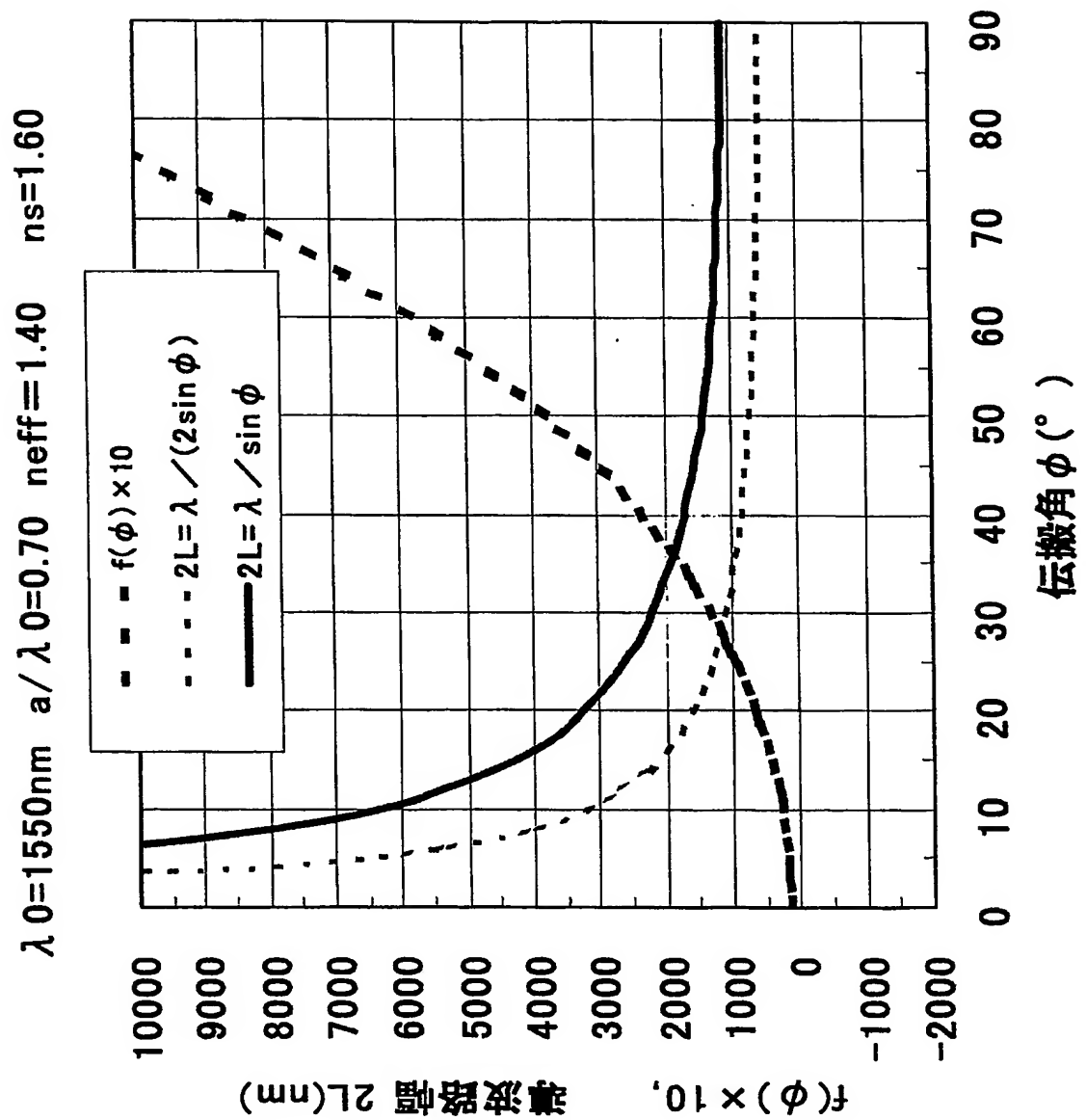
【図 33】



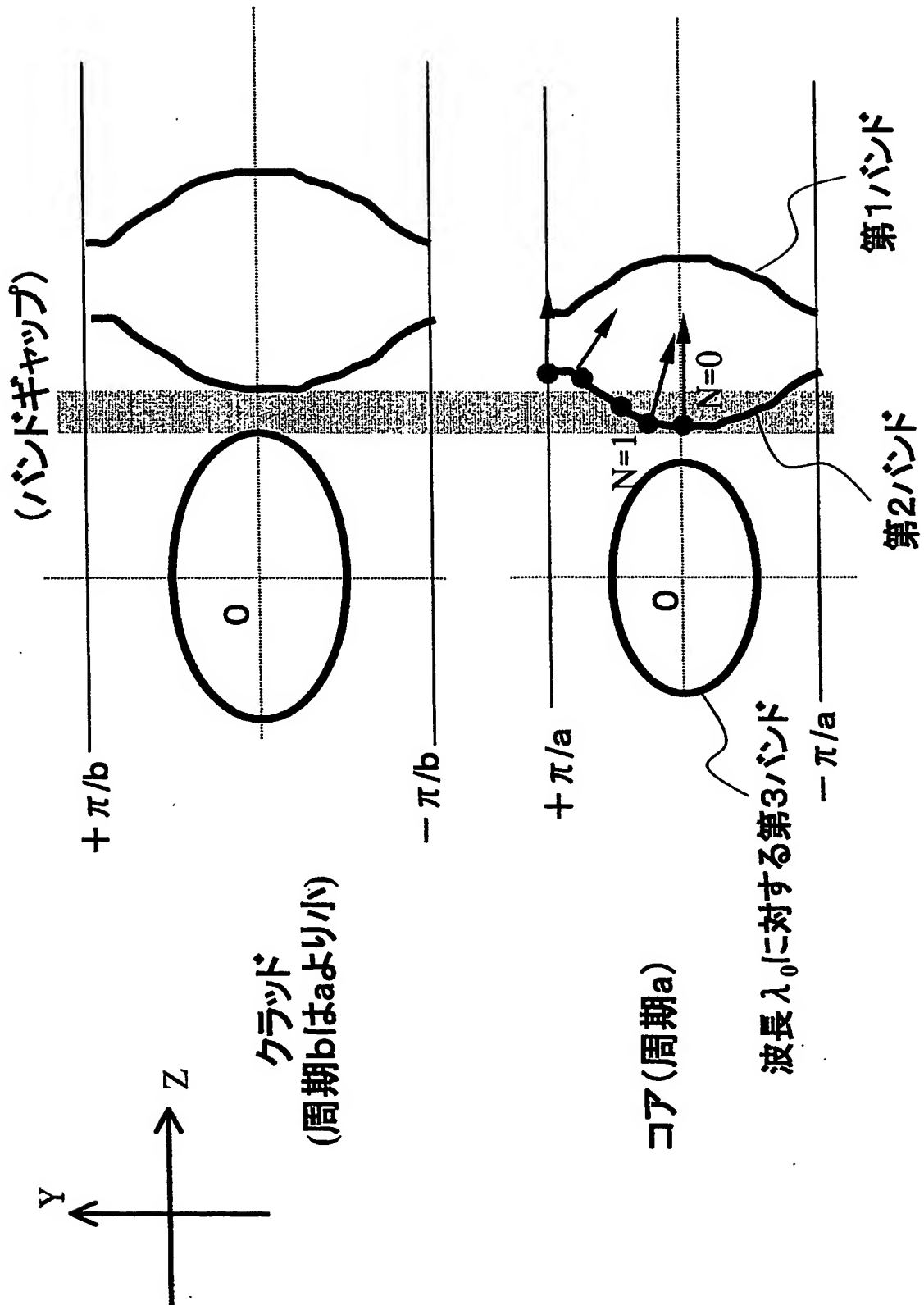
【図 34】



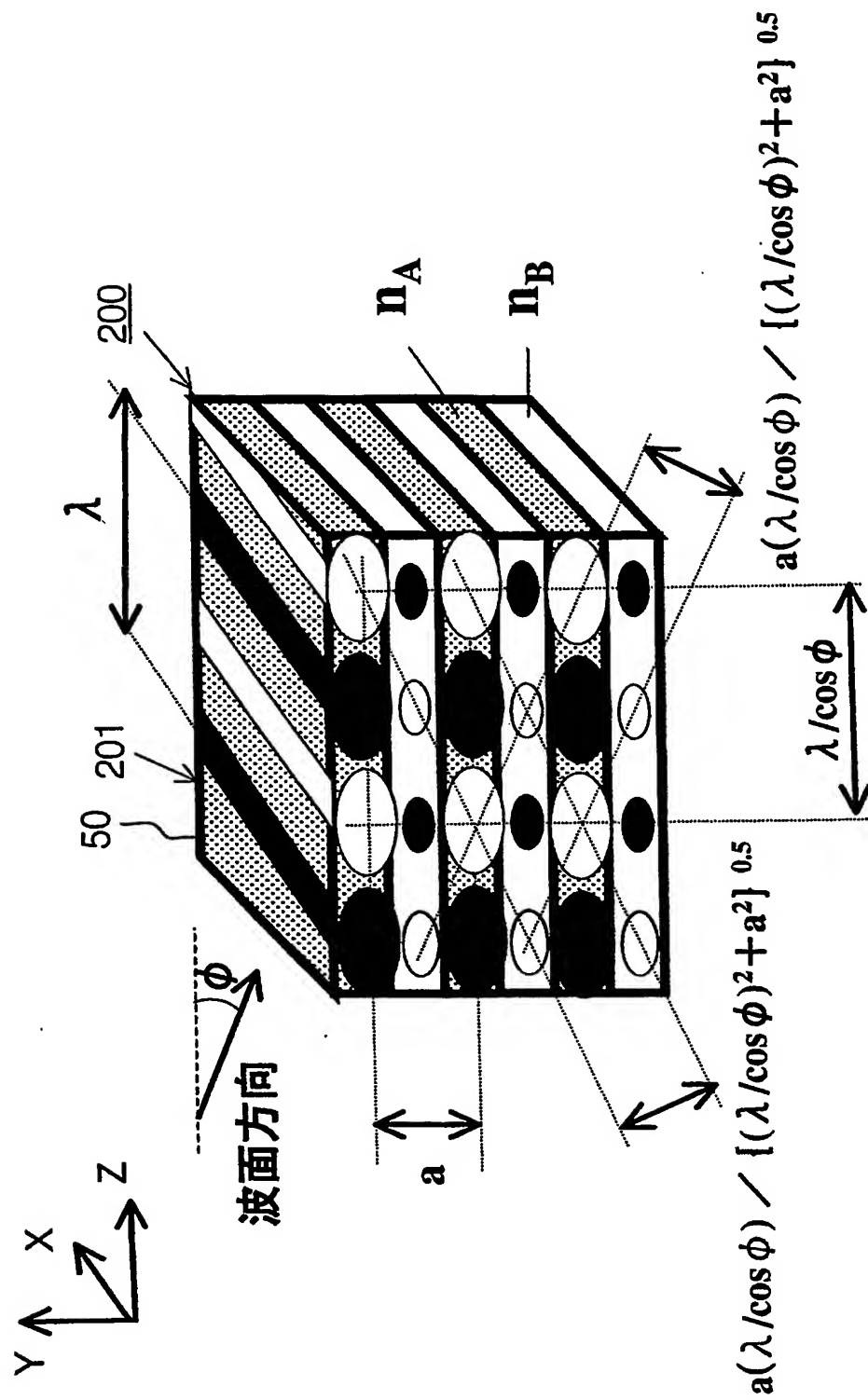
【図 35】



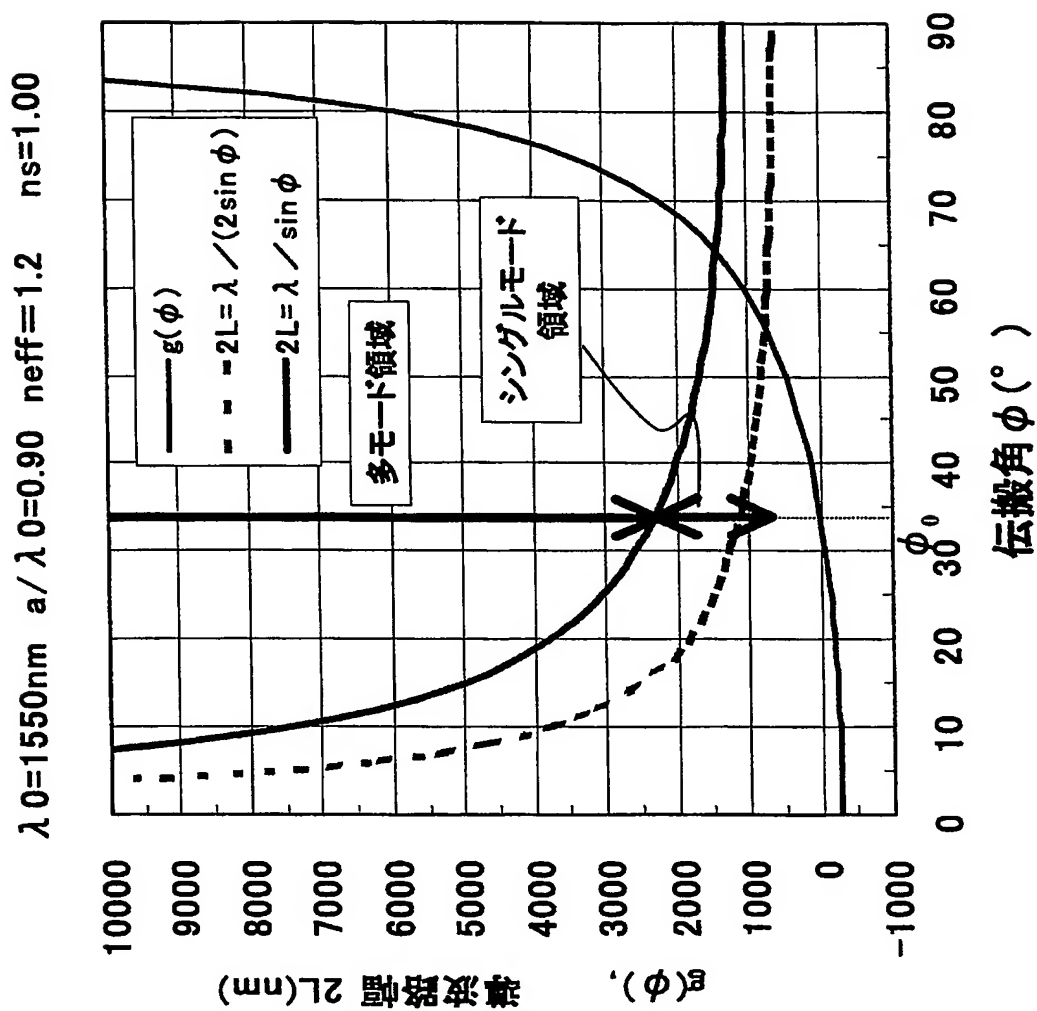
【図36】



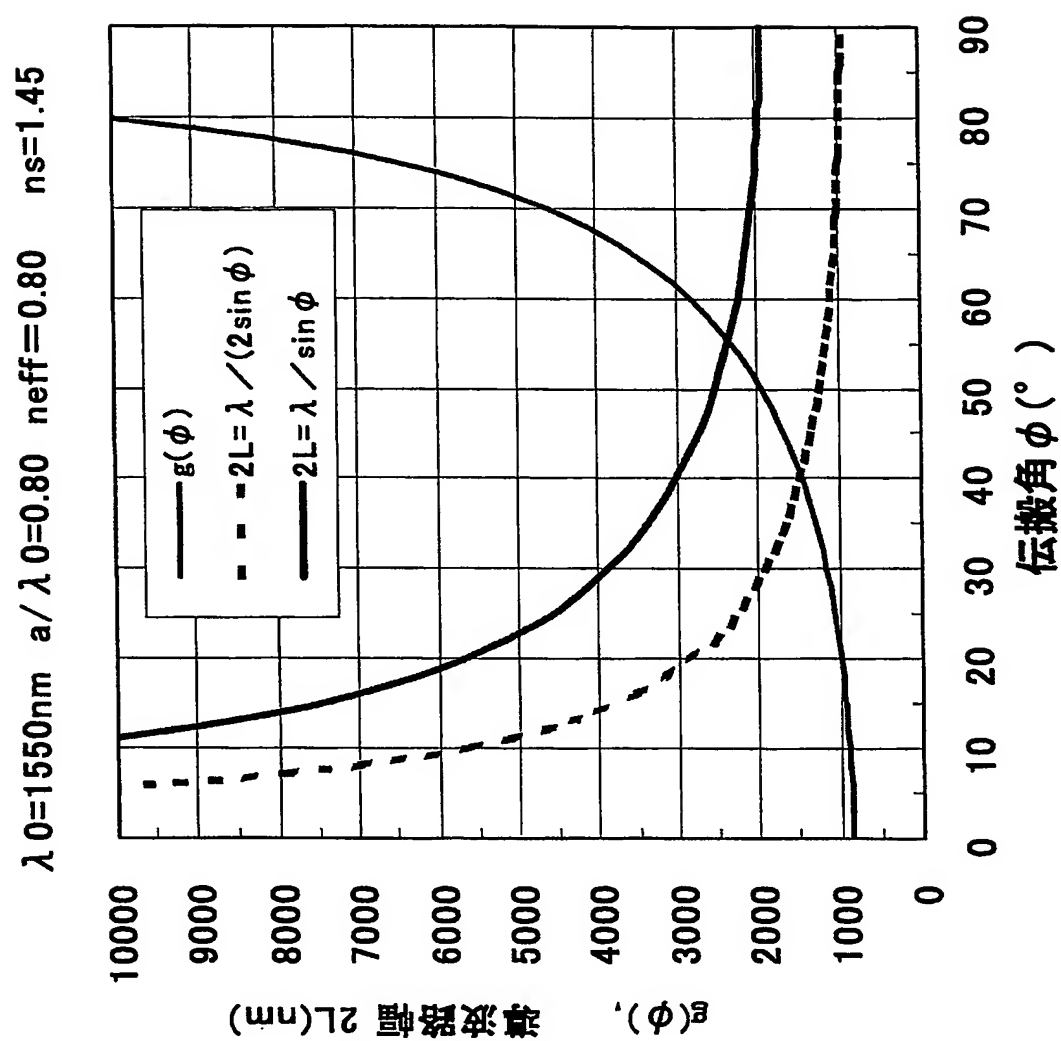
【図 3 7】



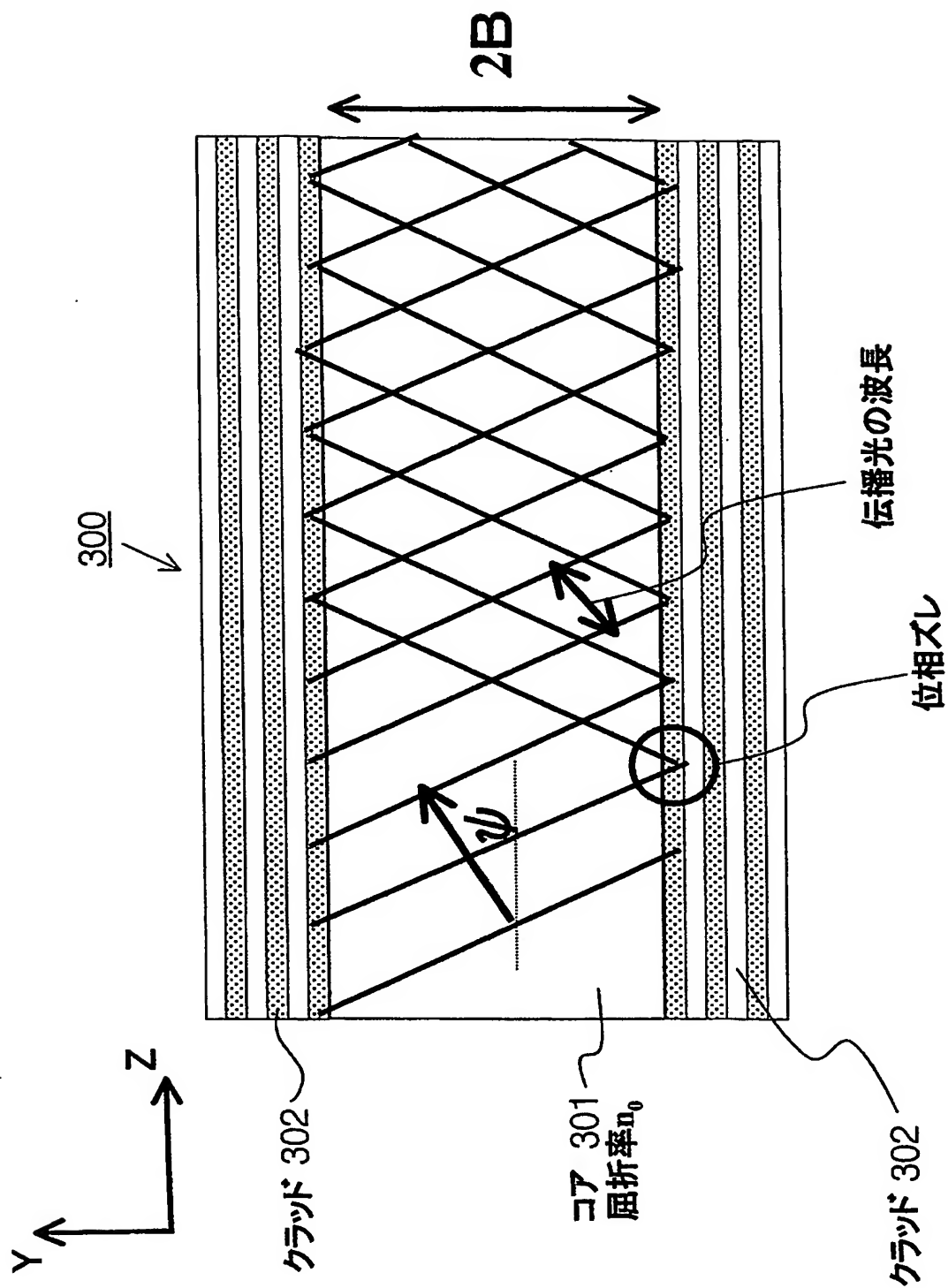
【図 38】



【図 39】

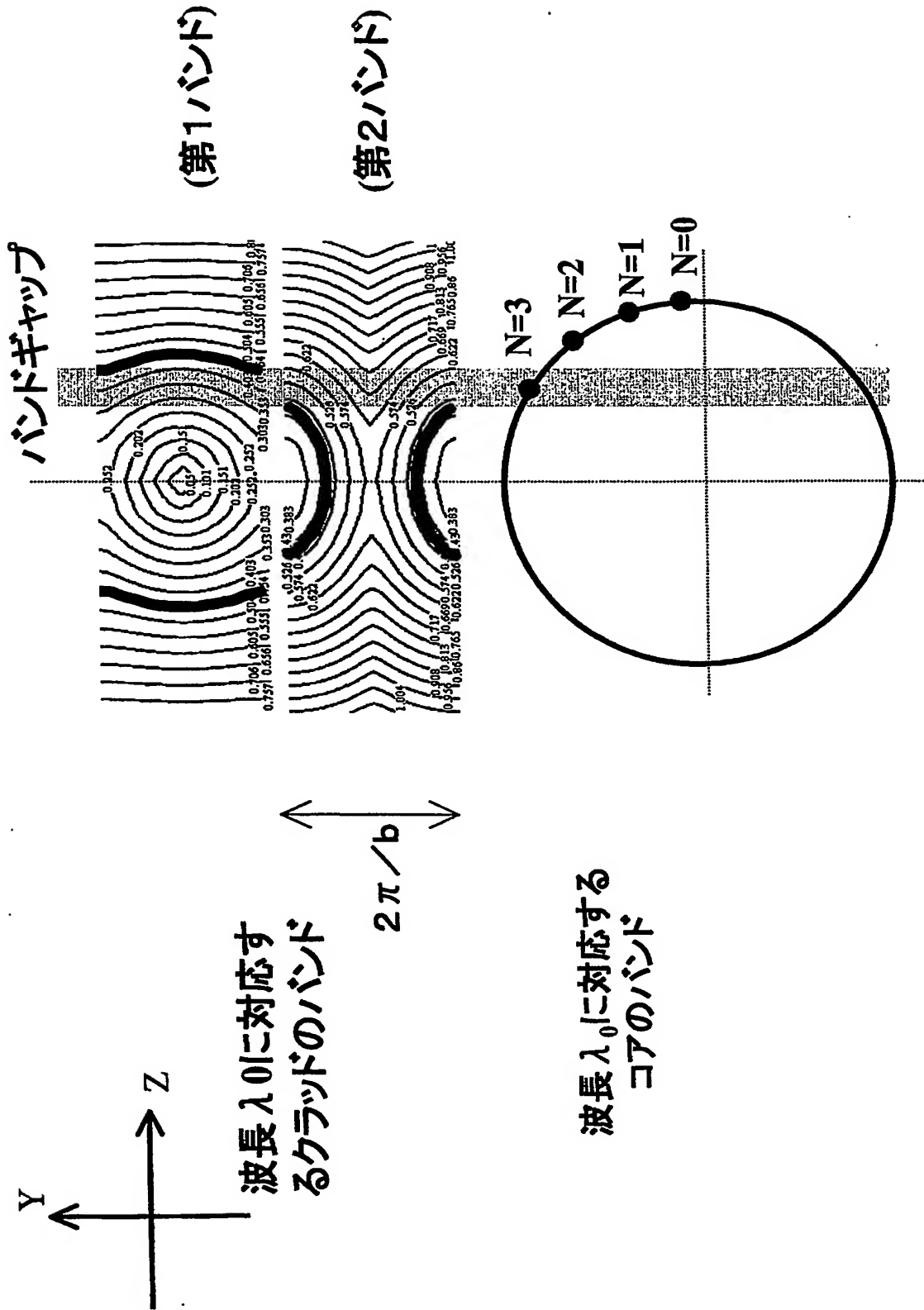


【図 40】



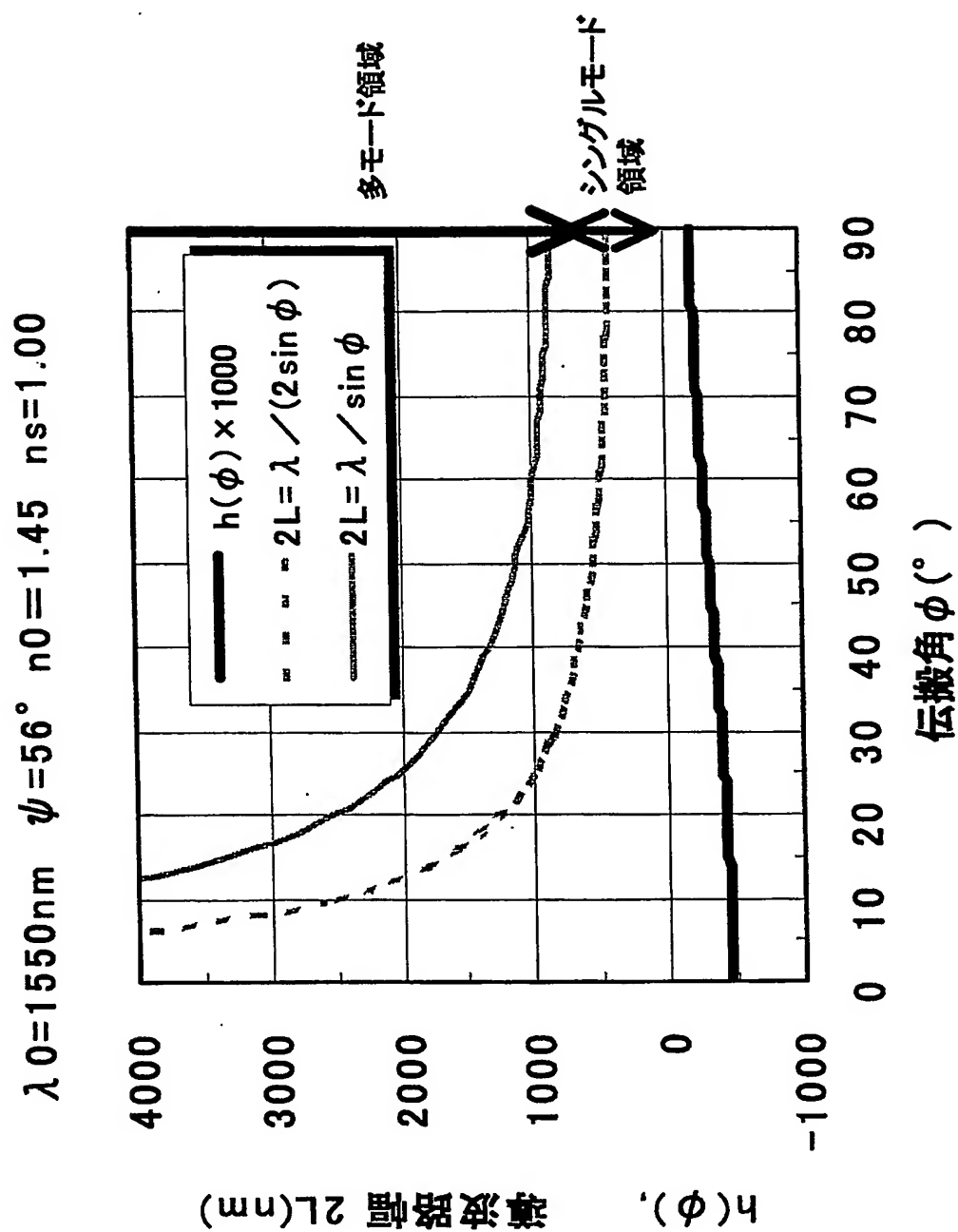


【図 41】

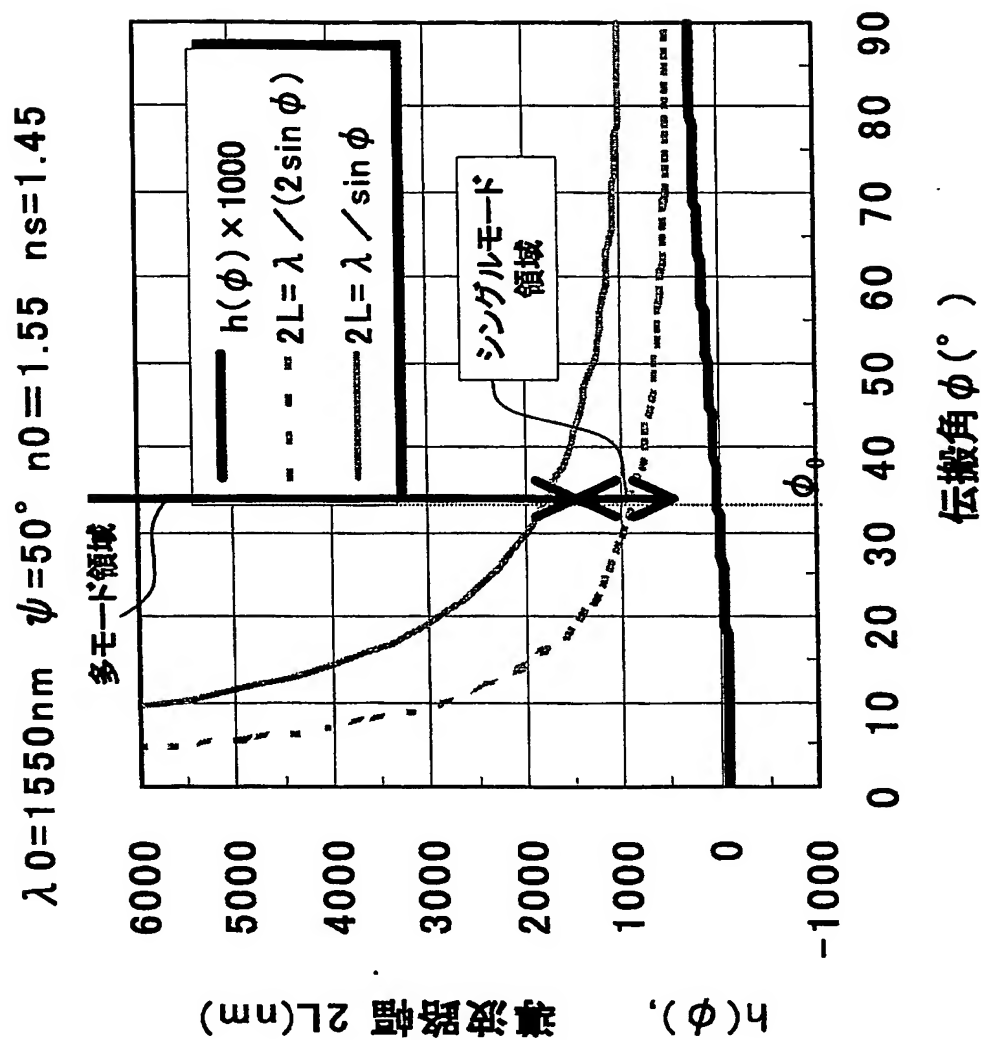




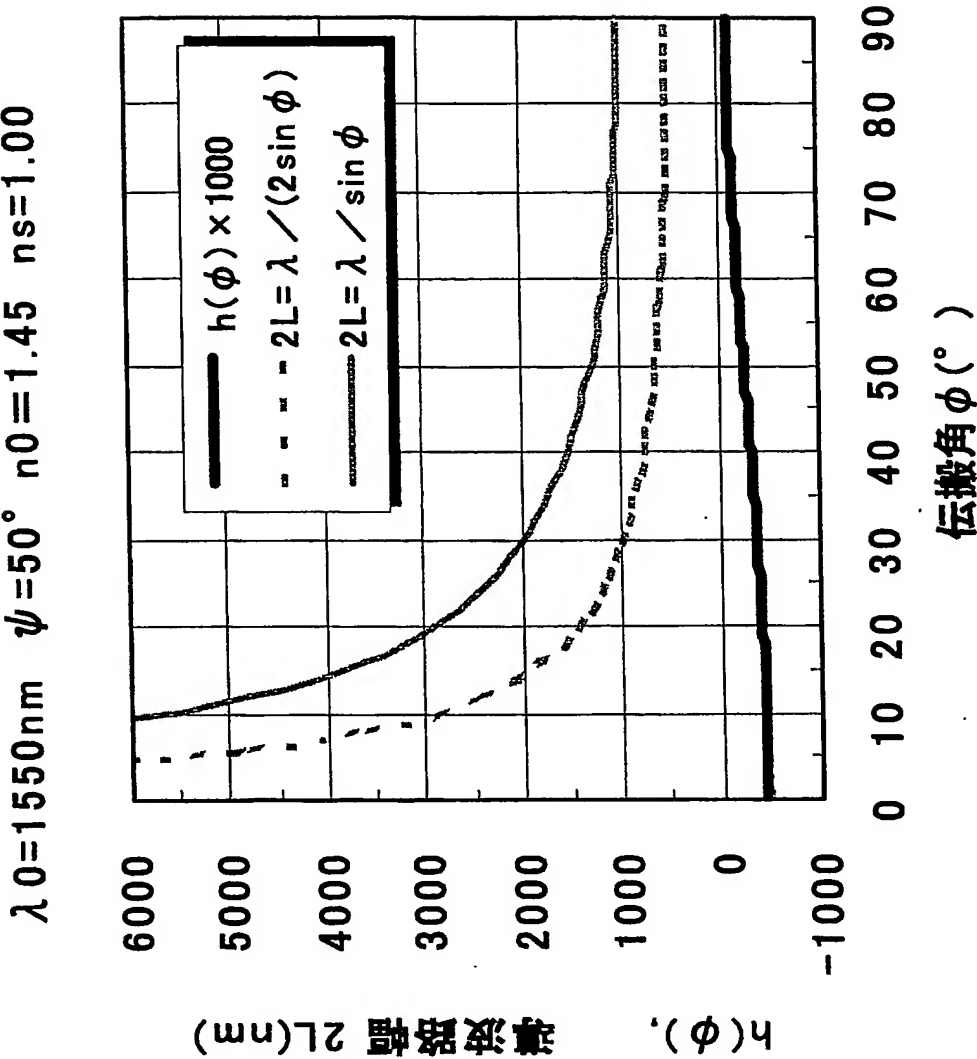
【図 4 3】



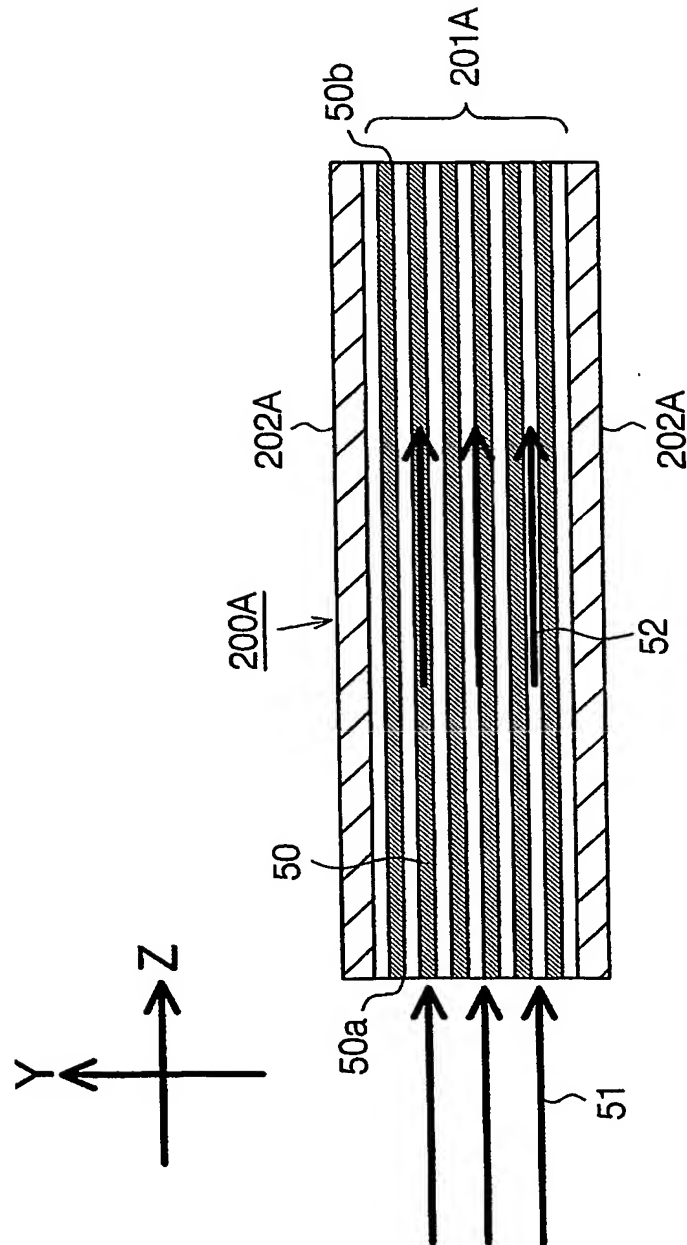
【図 4 4】



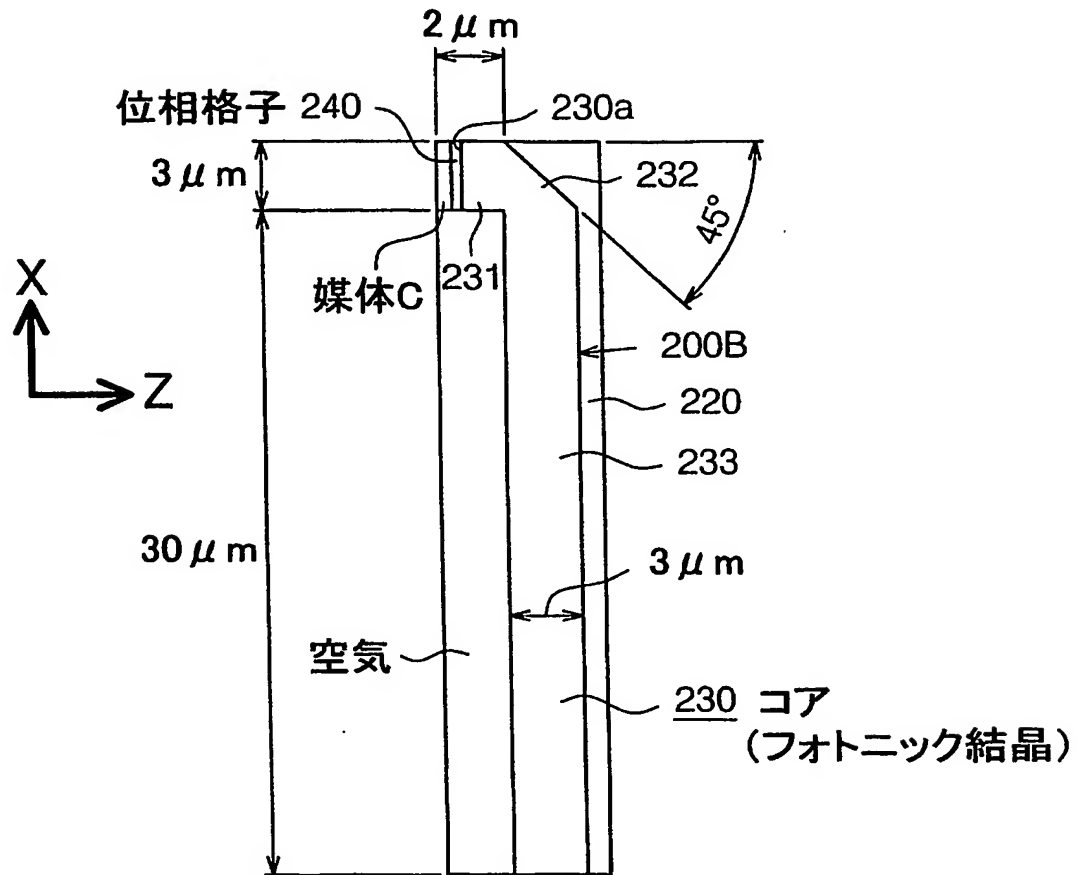
【図 45】



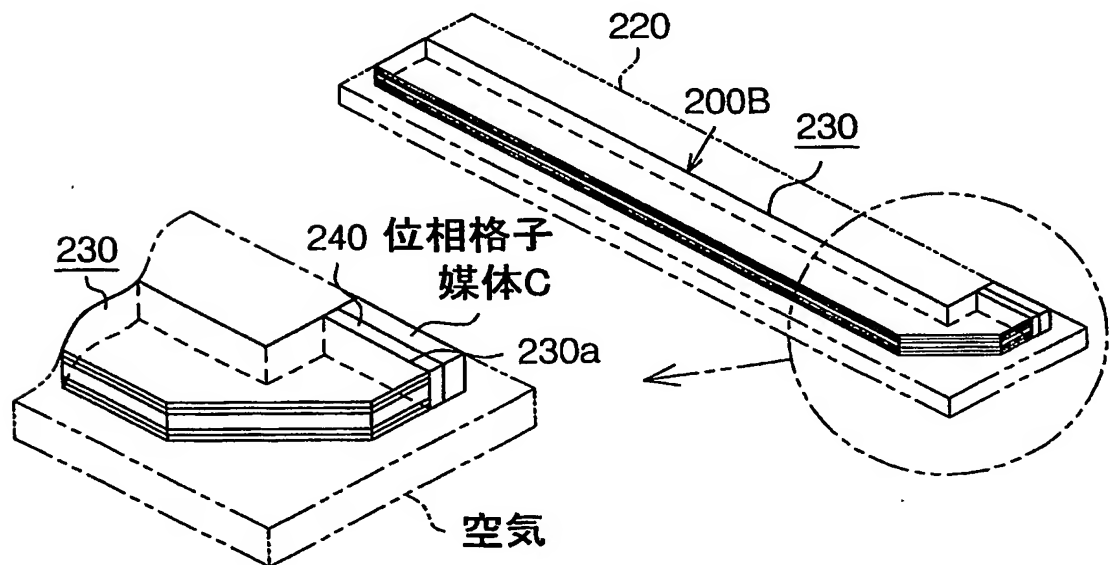
【図 46】



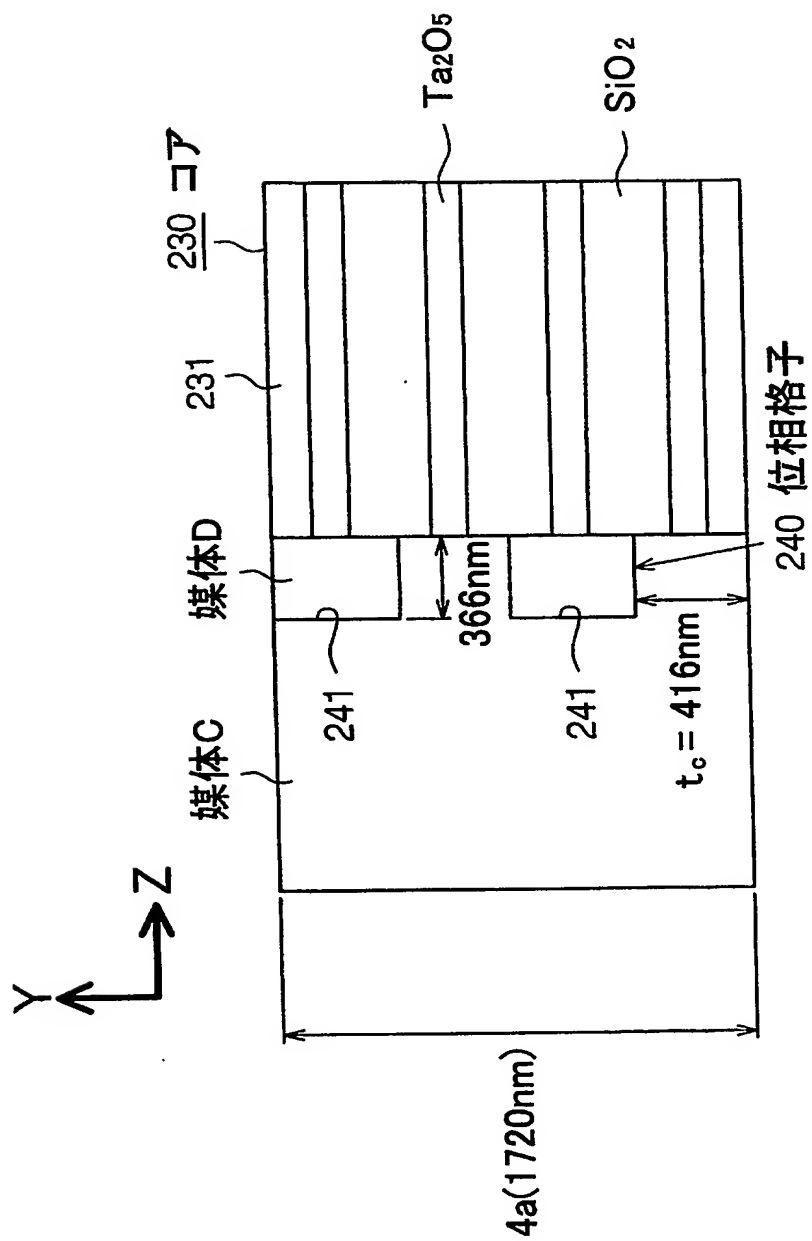
【図 4 7】



【図 4 8】

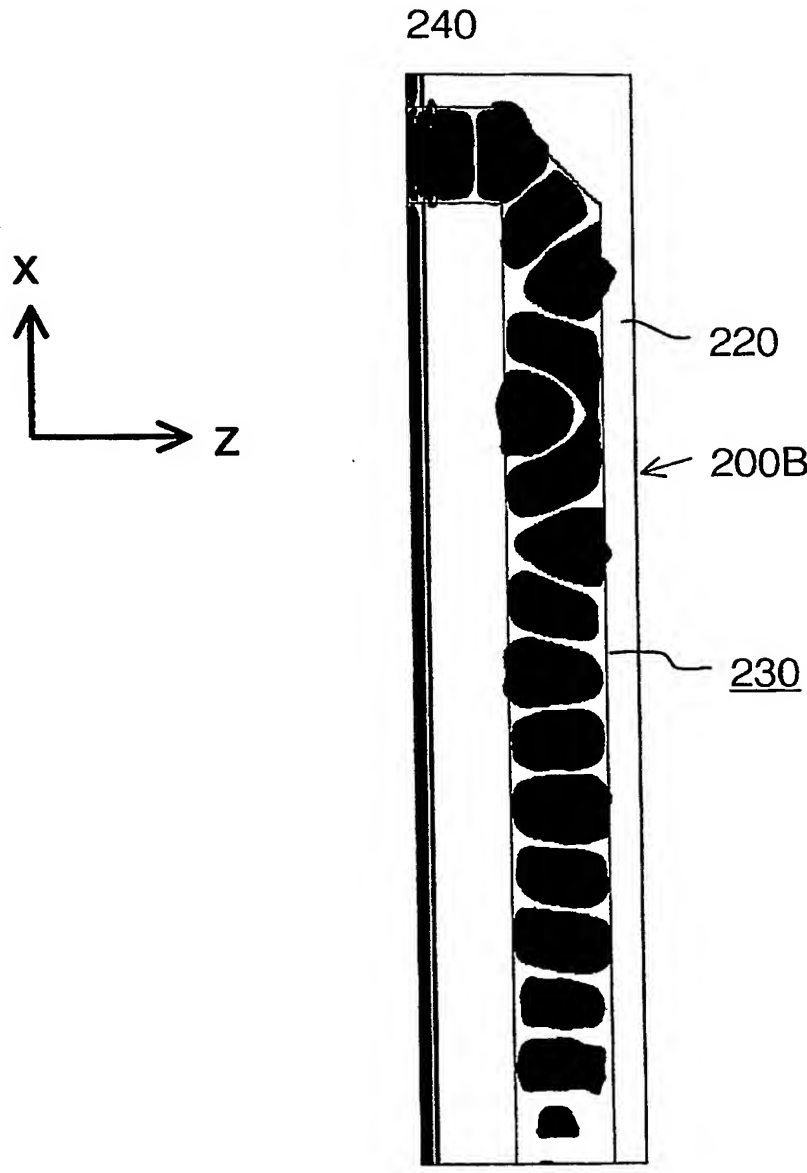


【図 49】

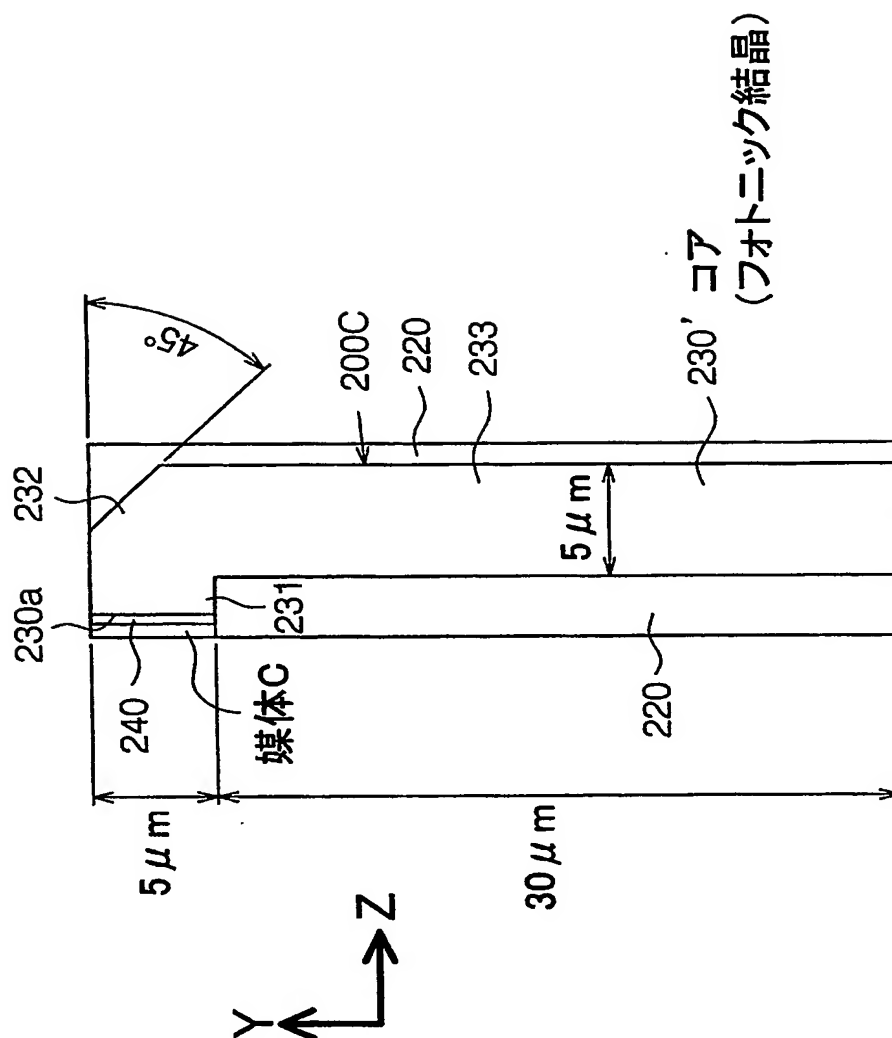




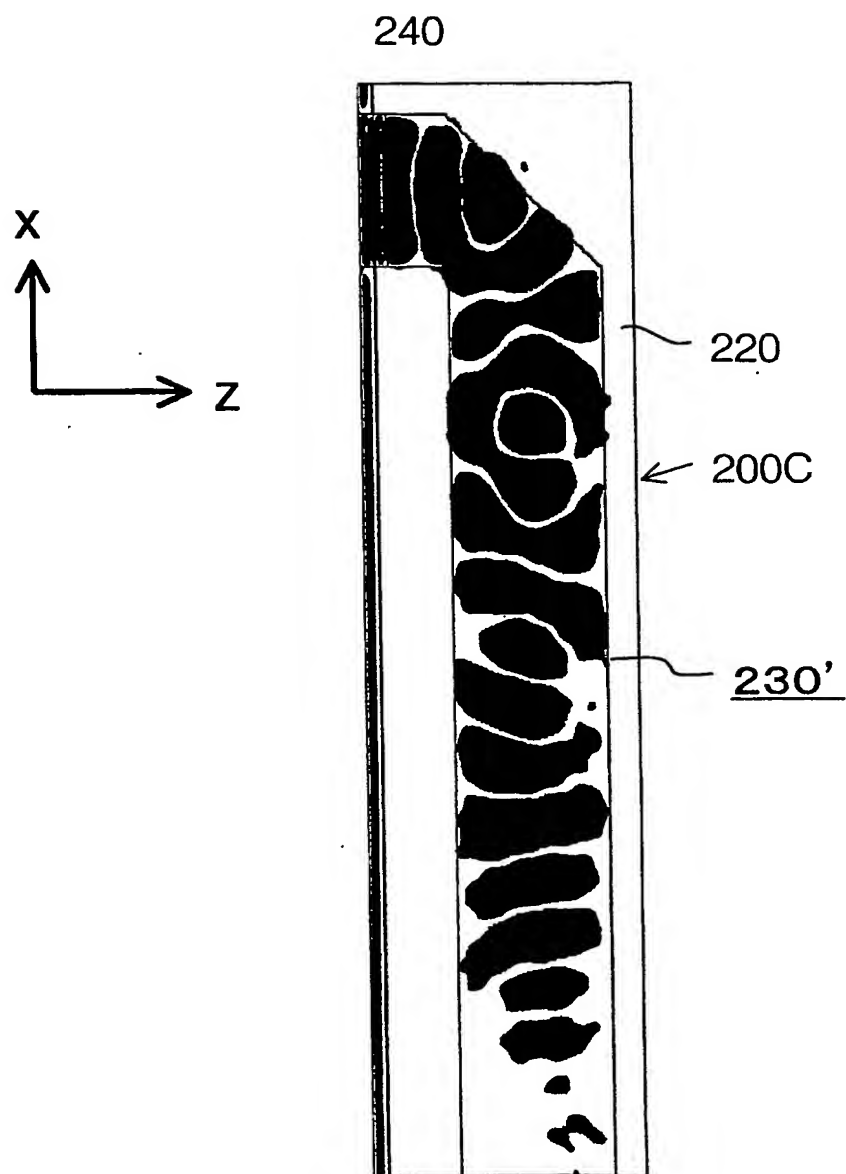
【図 50】



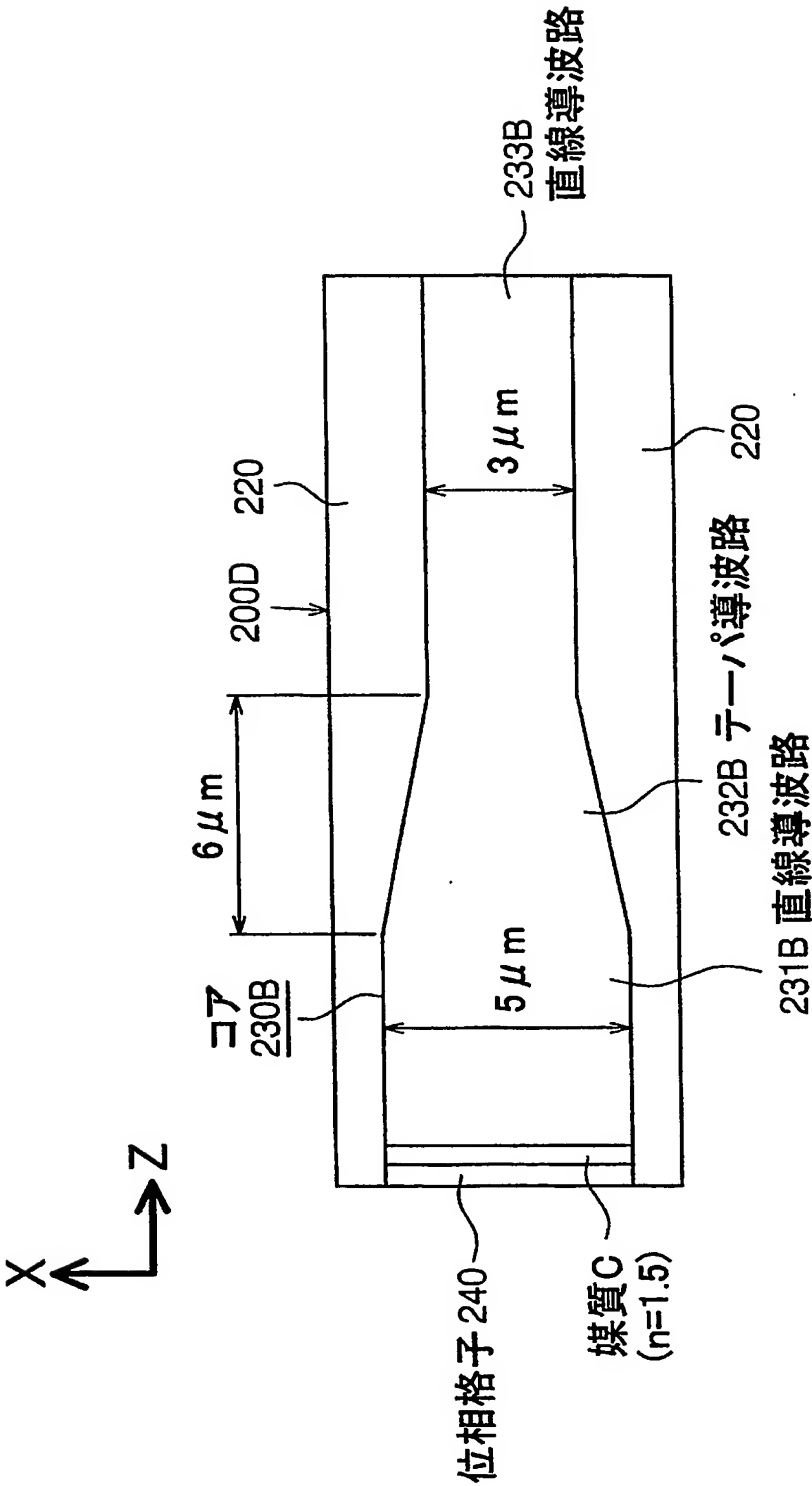
【図 51】



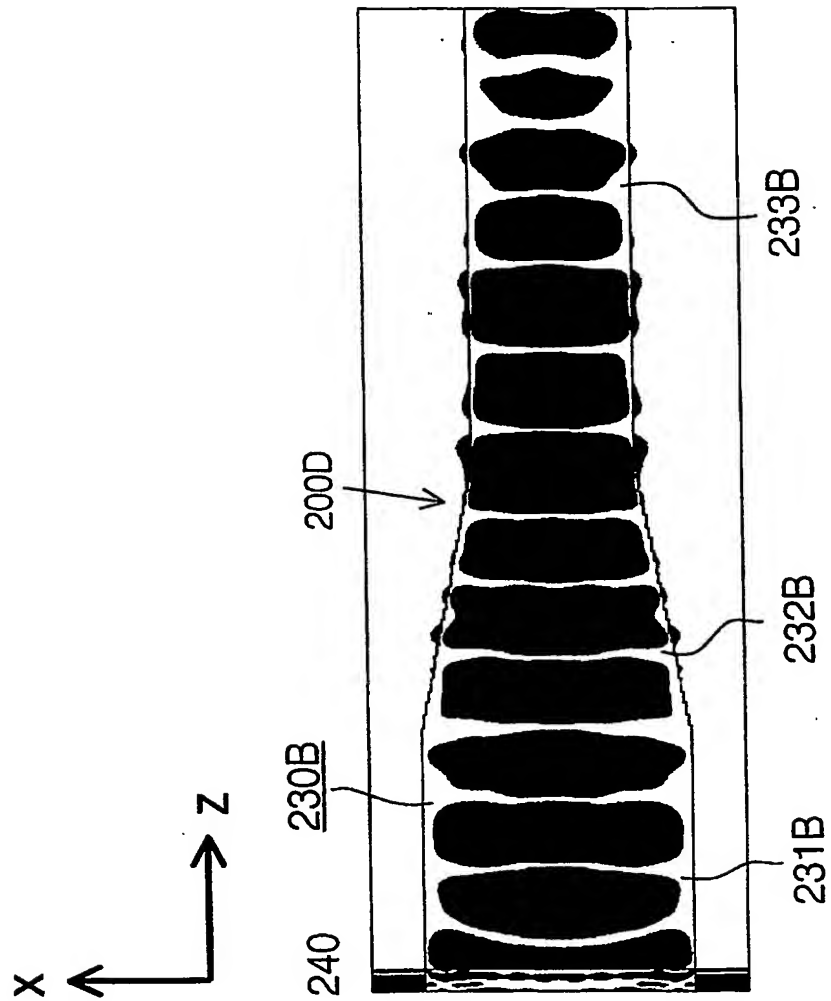
【図 52】



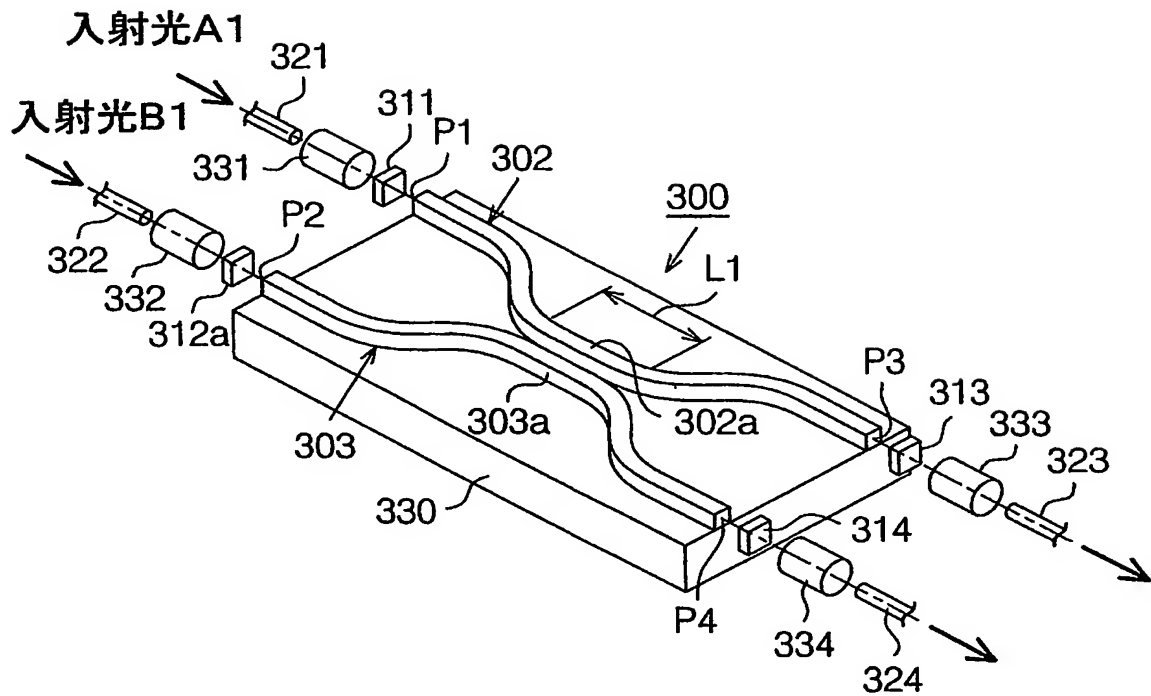
【図 53】



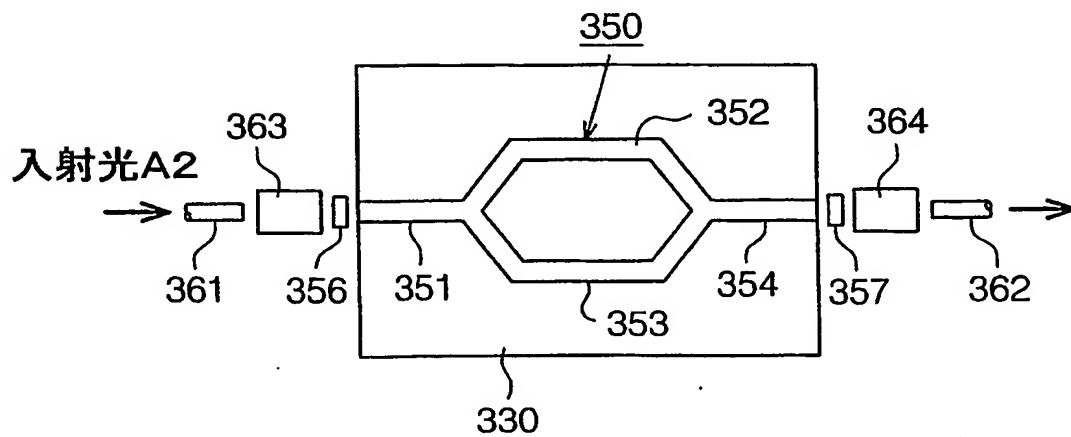
【図 54】



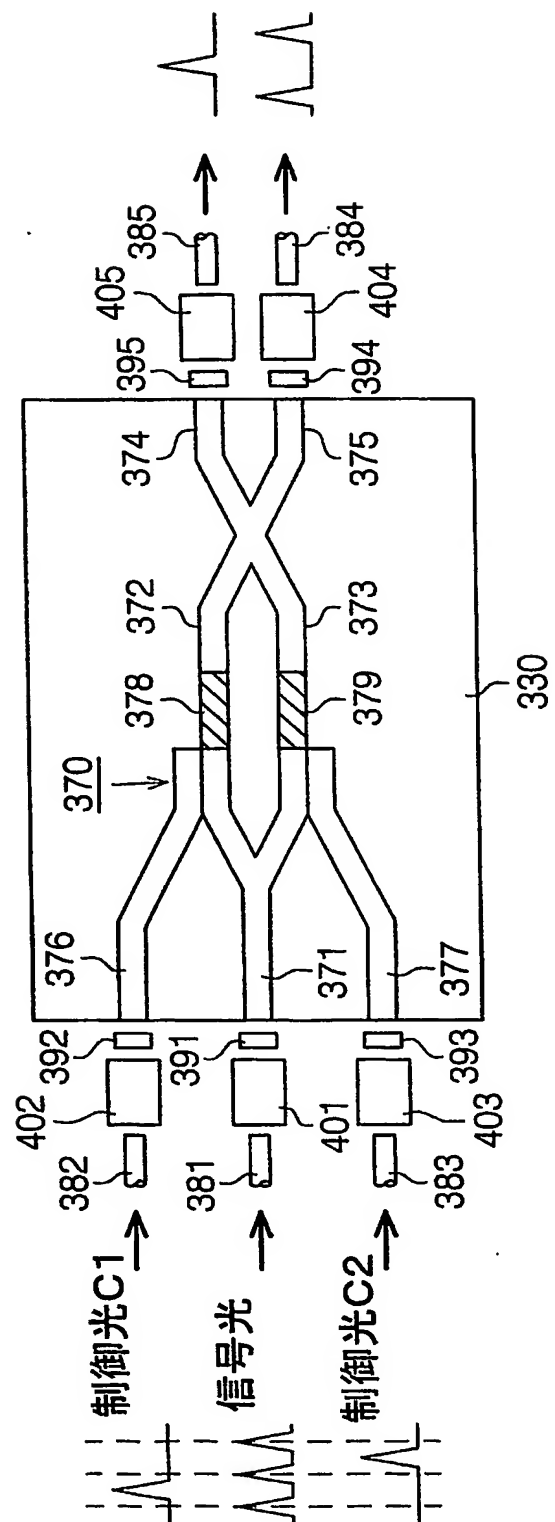
【図 5 5】



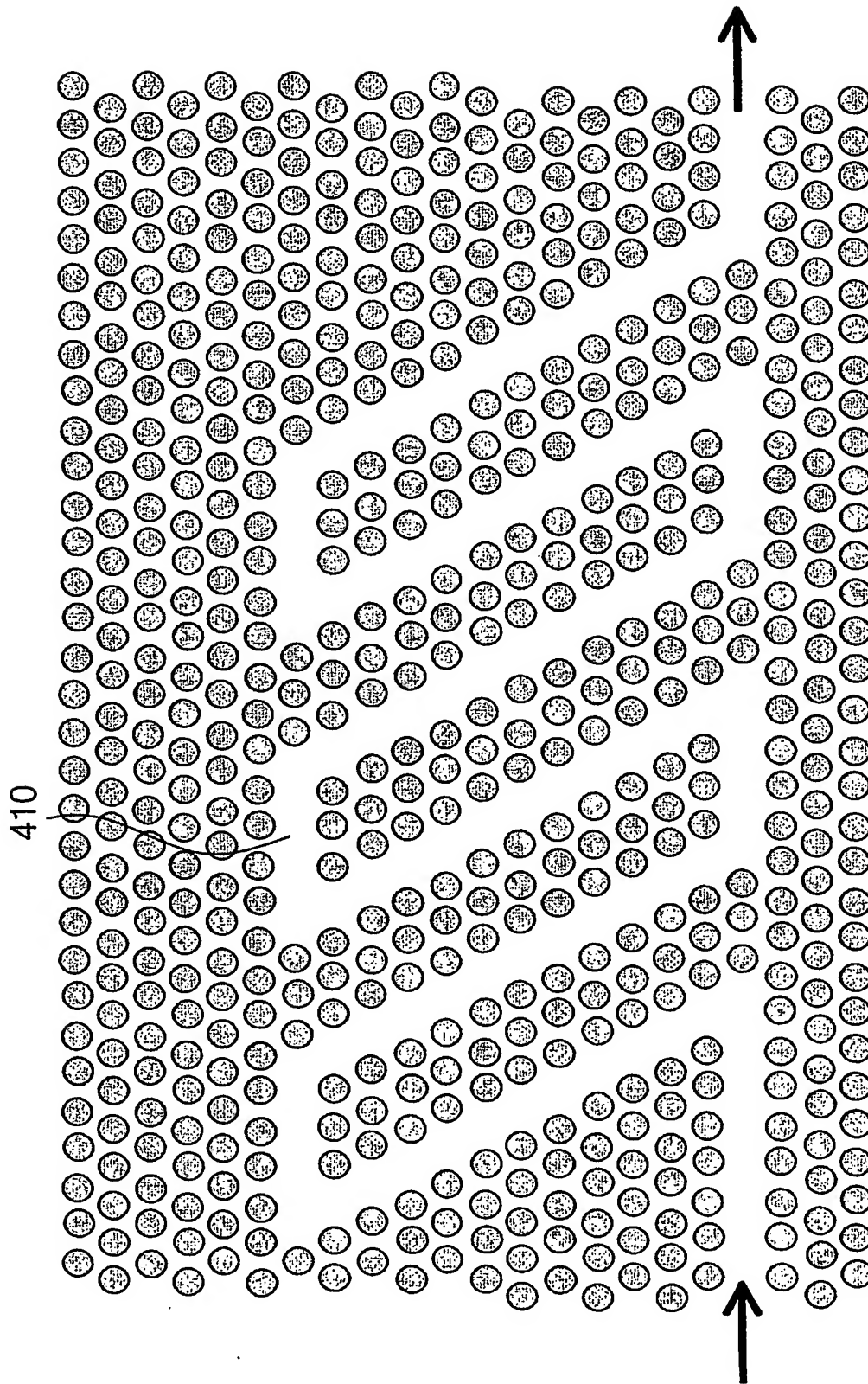
【図 5 6】



【図 57】



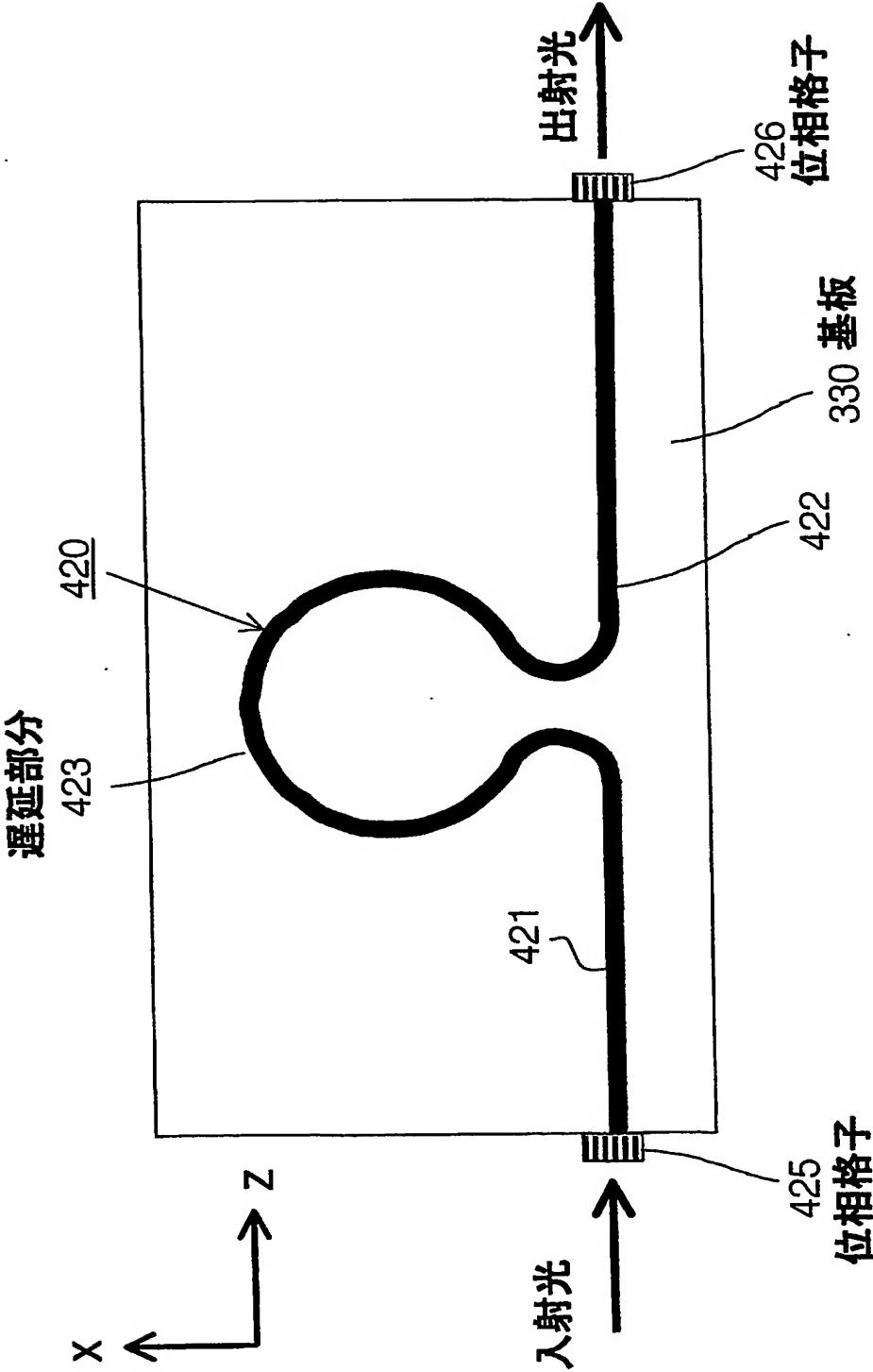
【図 58】



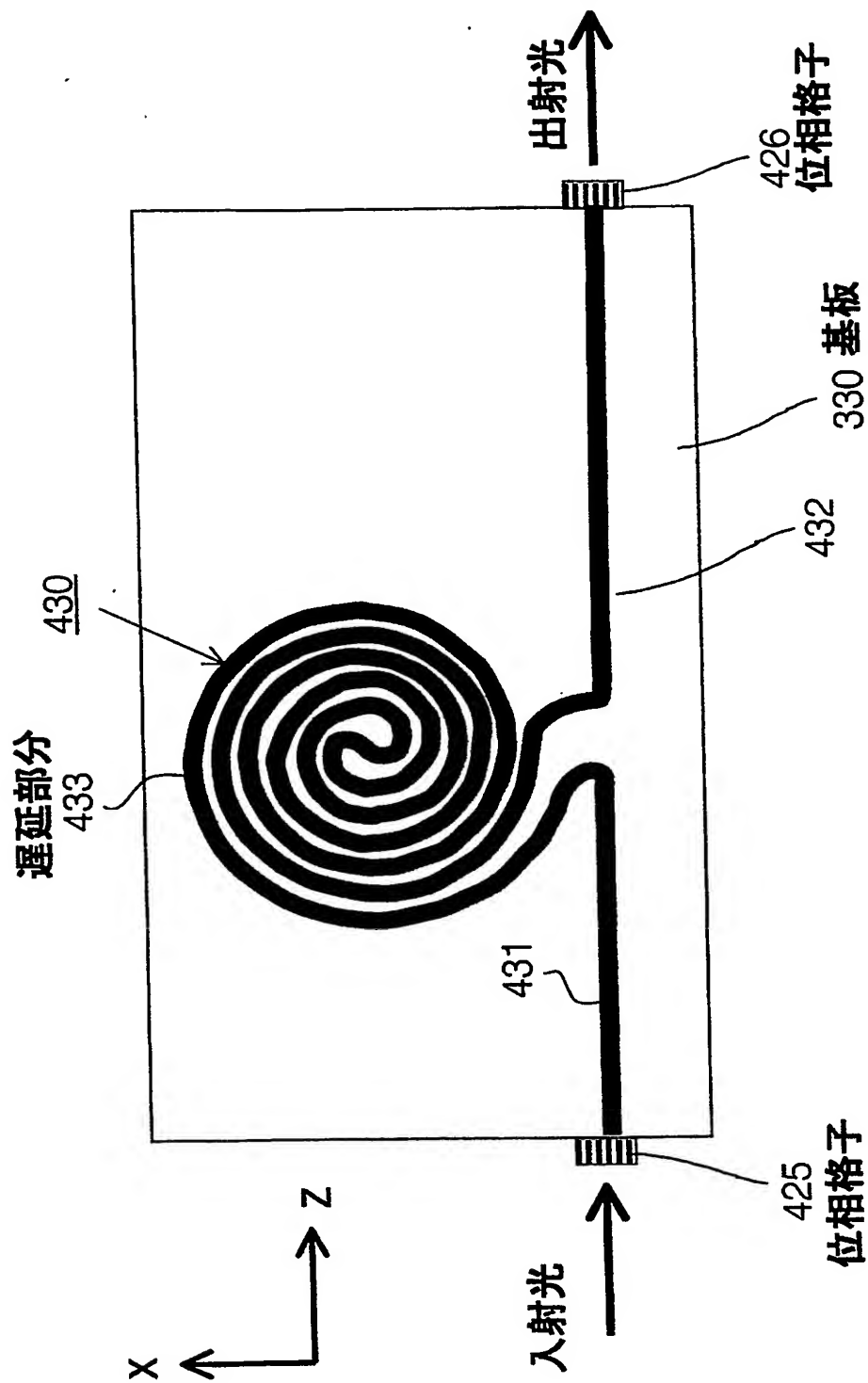
2次元フォトニック結晶欠陥導波路による遅延線の例



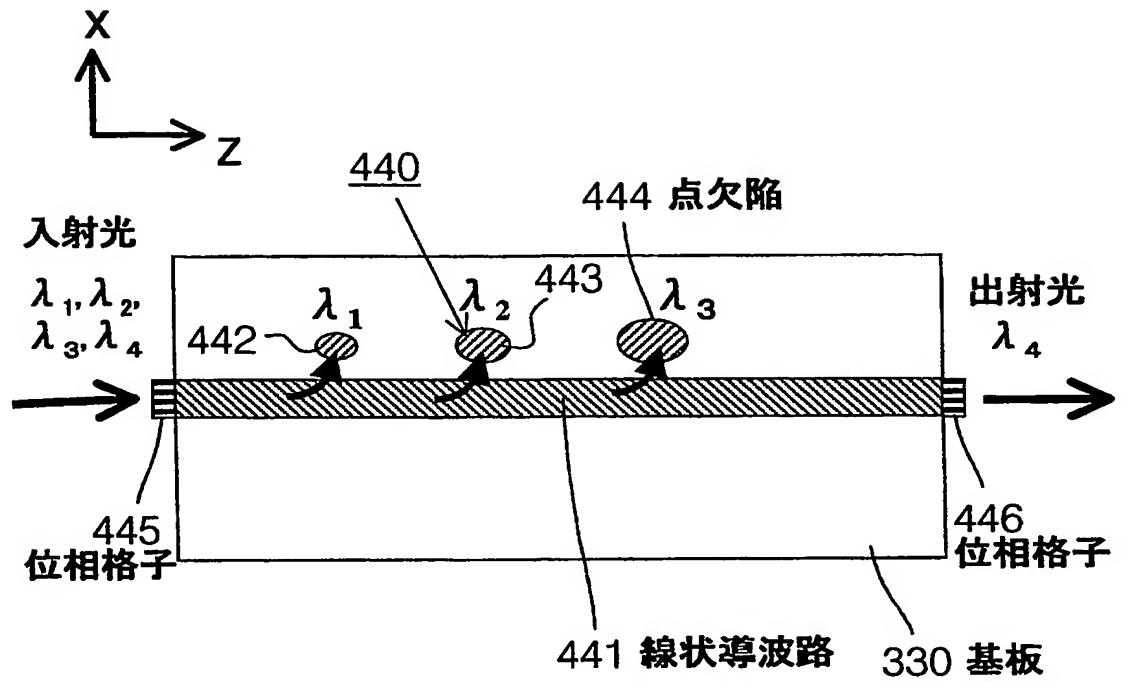
【図 59】



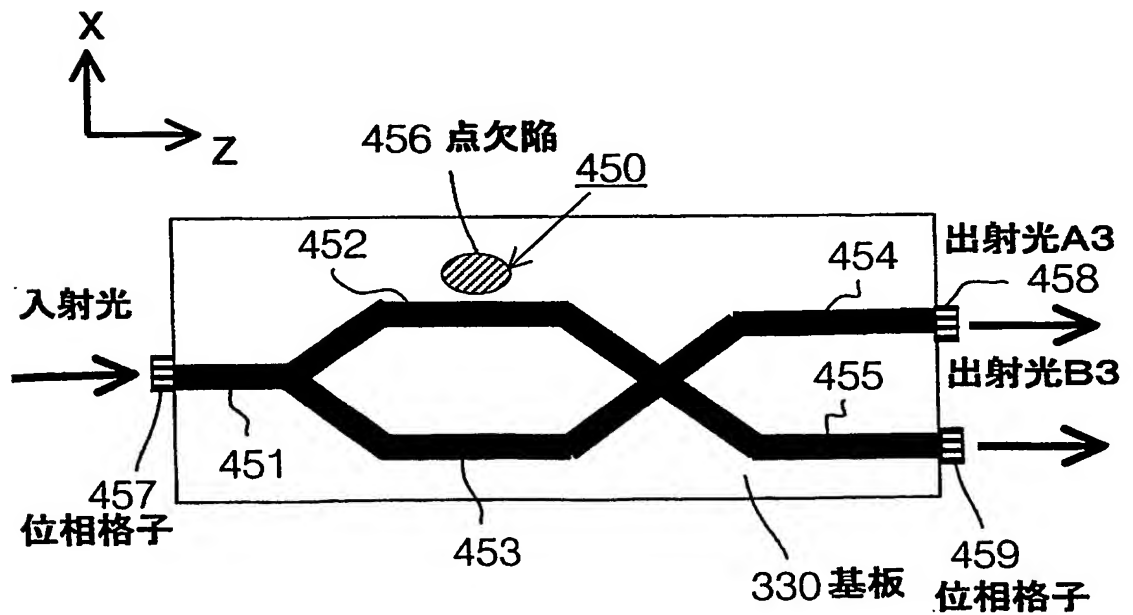
【図 60】



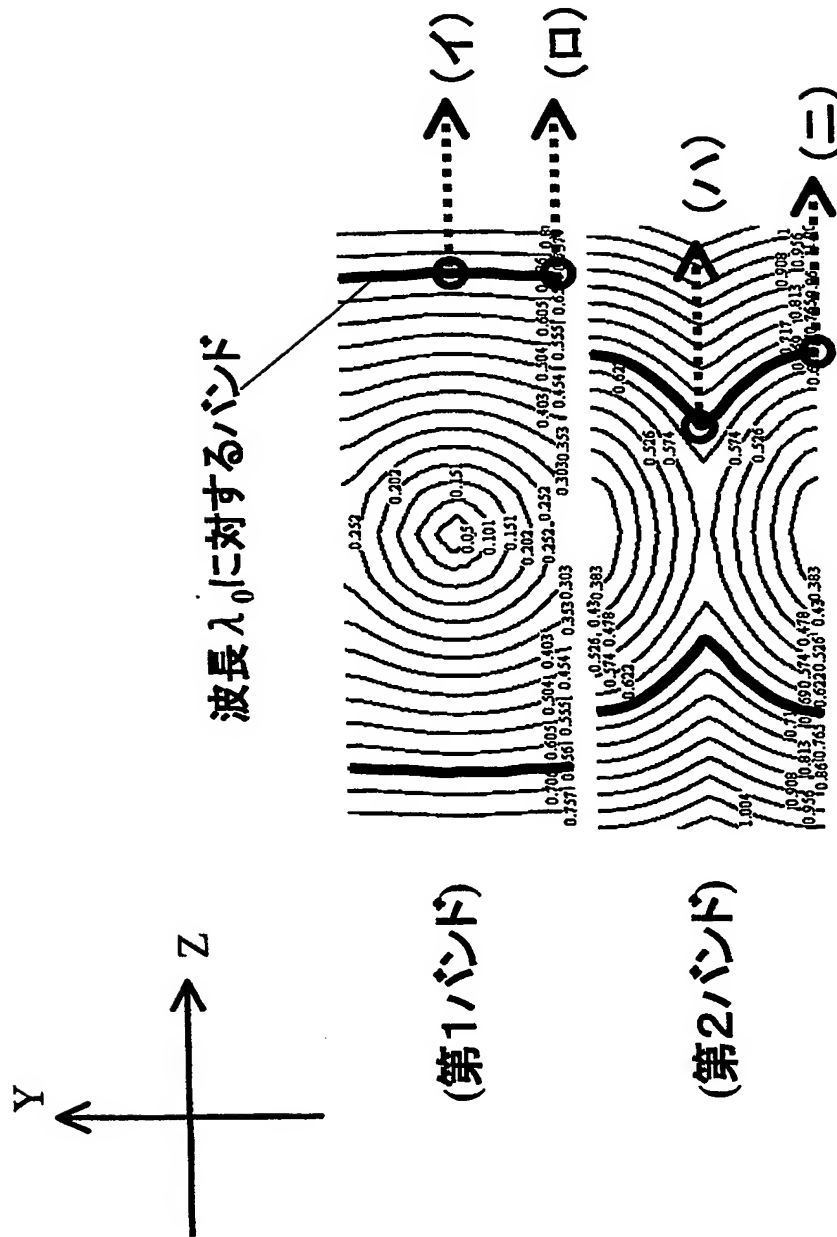
【図 6 1】



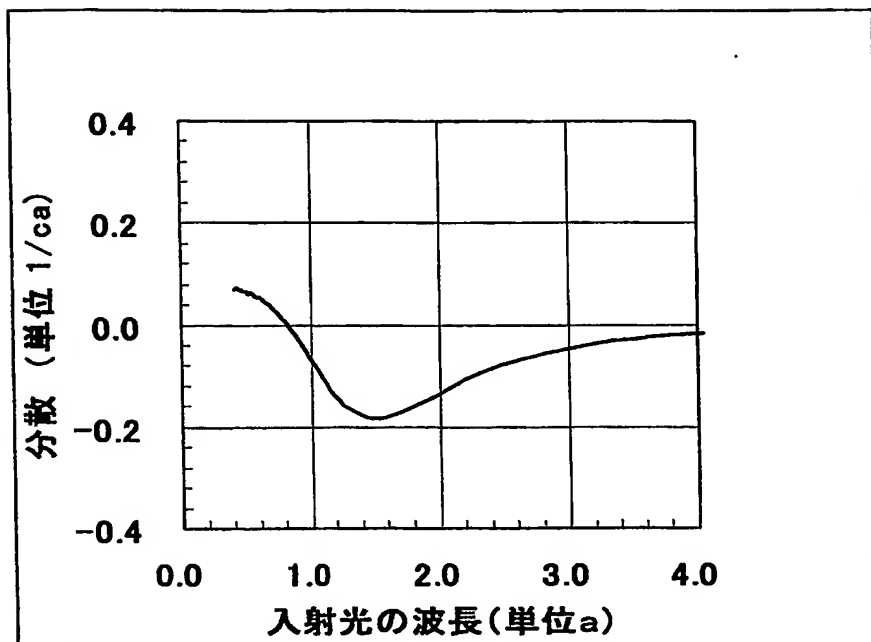
【図 6 2】



【図 63】

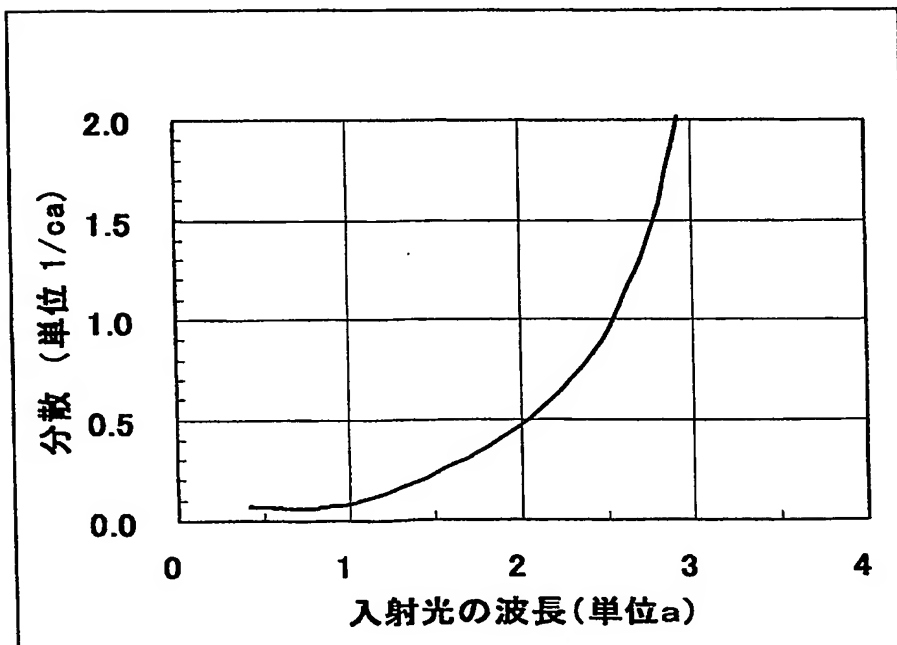


【図 6 4】



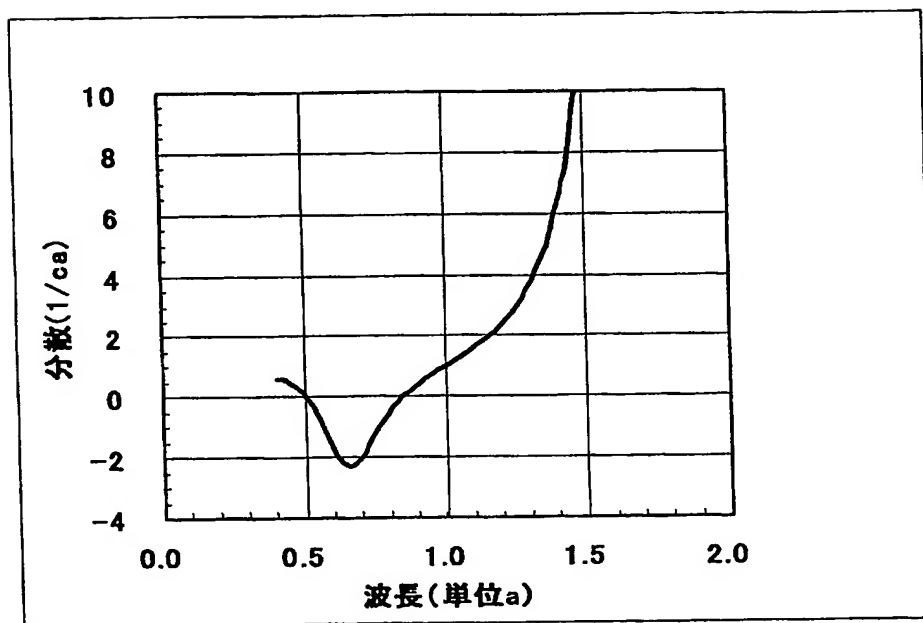
(イ)

【図 6 5】



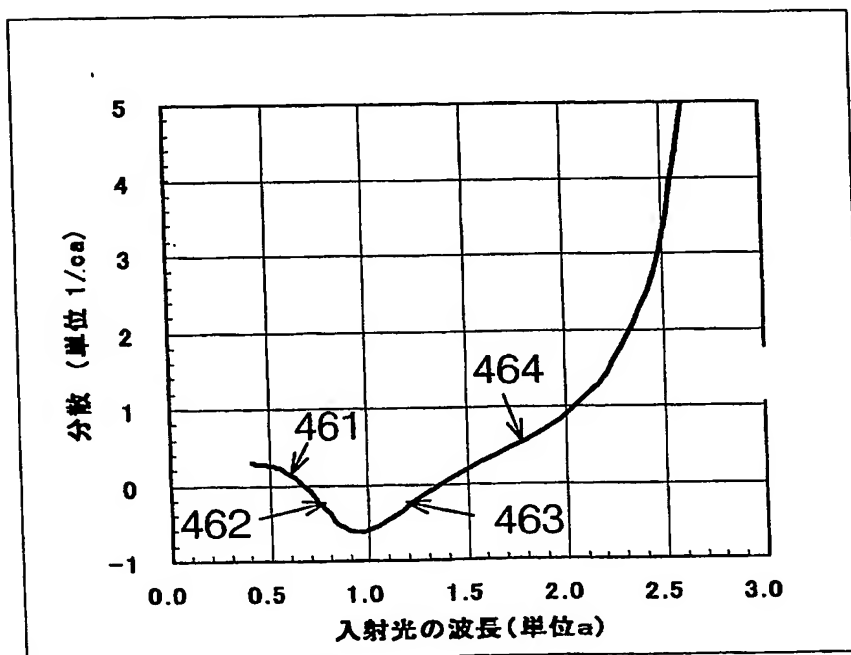
(ロ)

【図 66】



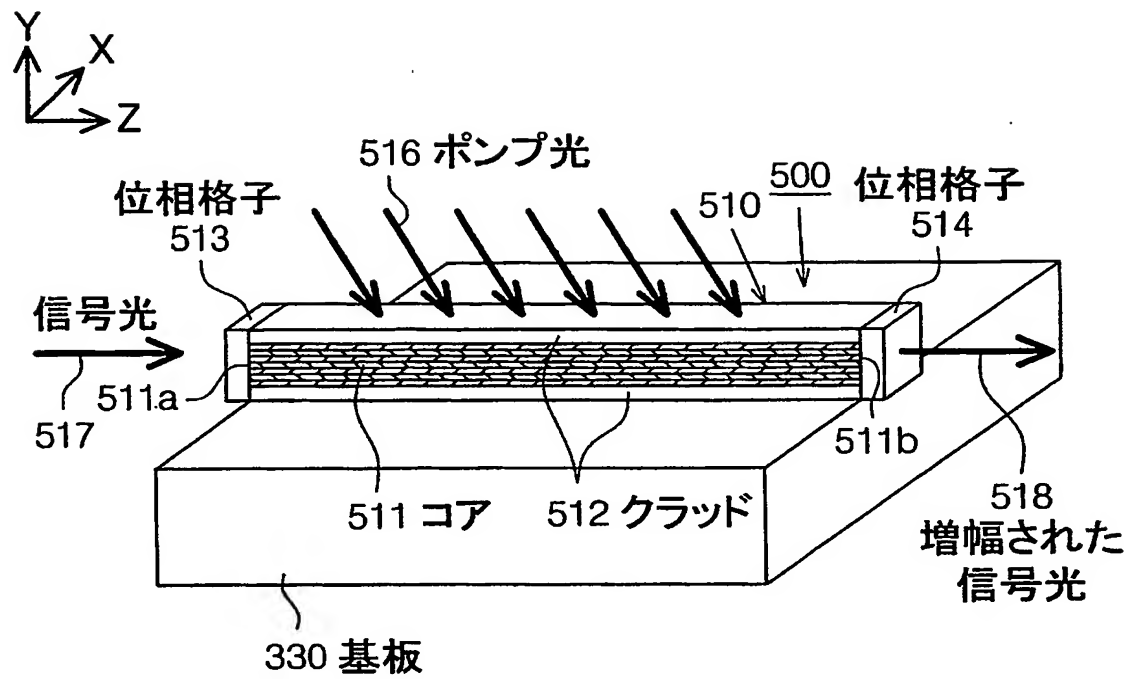
(ハ)

【図 67】

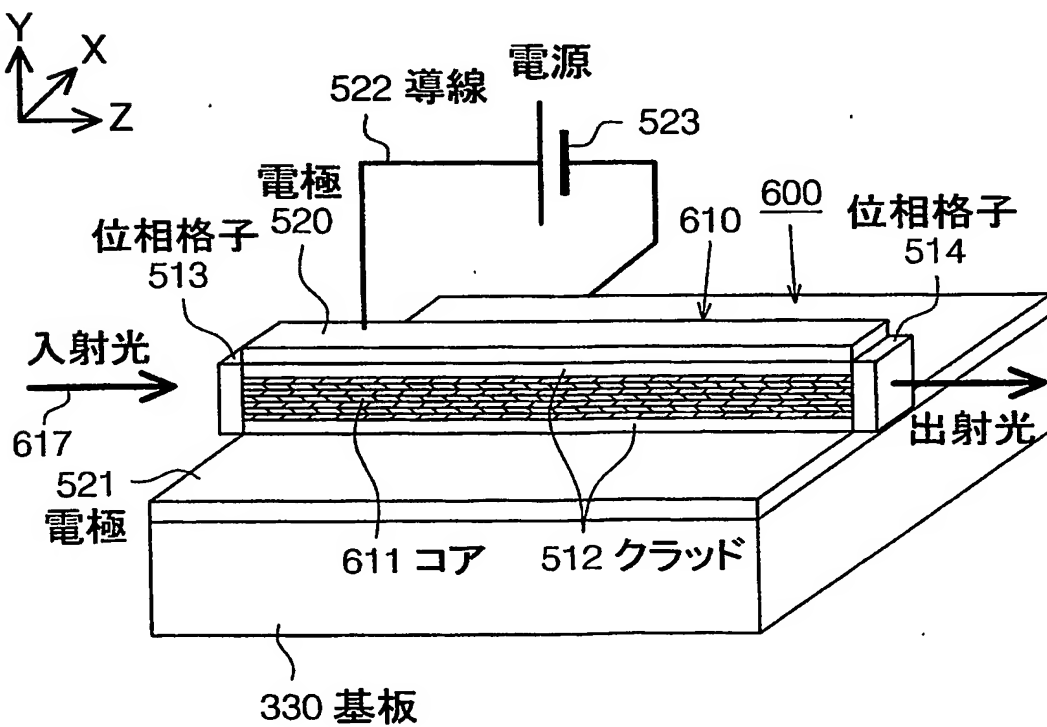


(二)

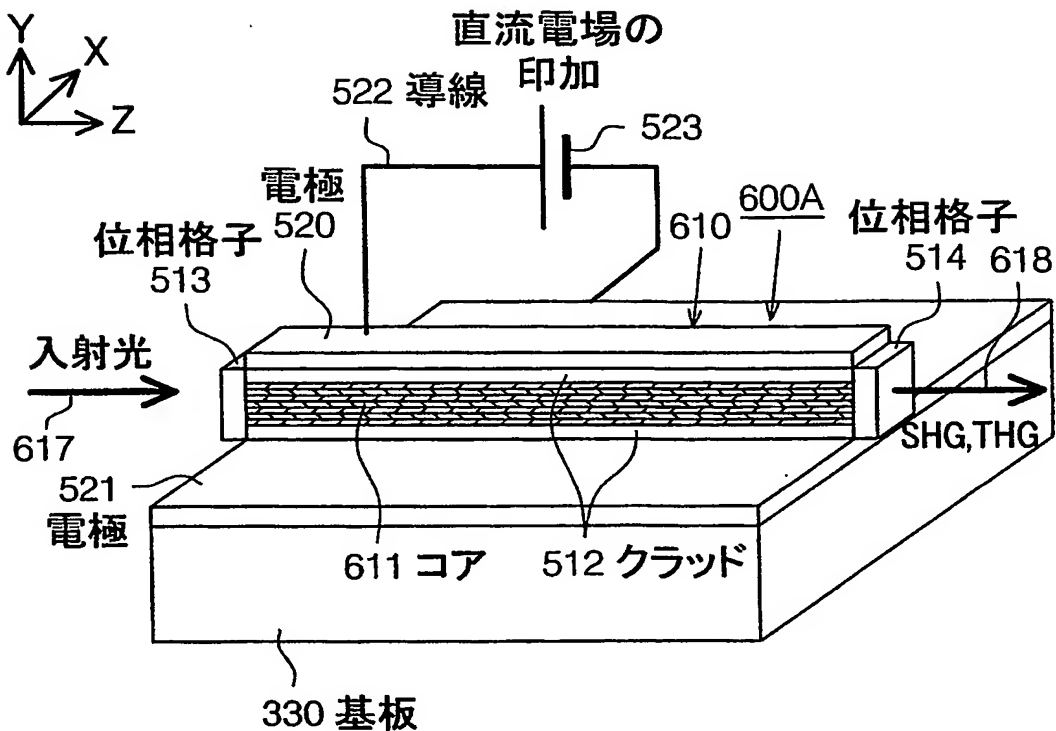
【図 68】



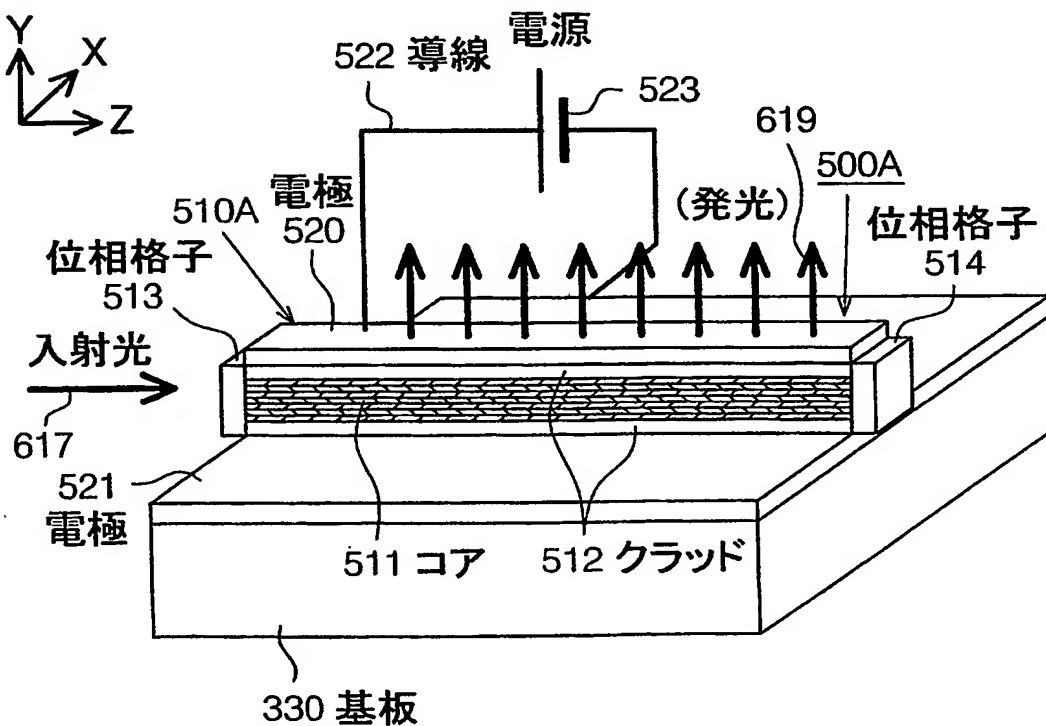
【図 69】



【図 70】

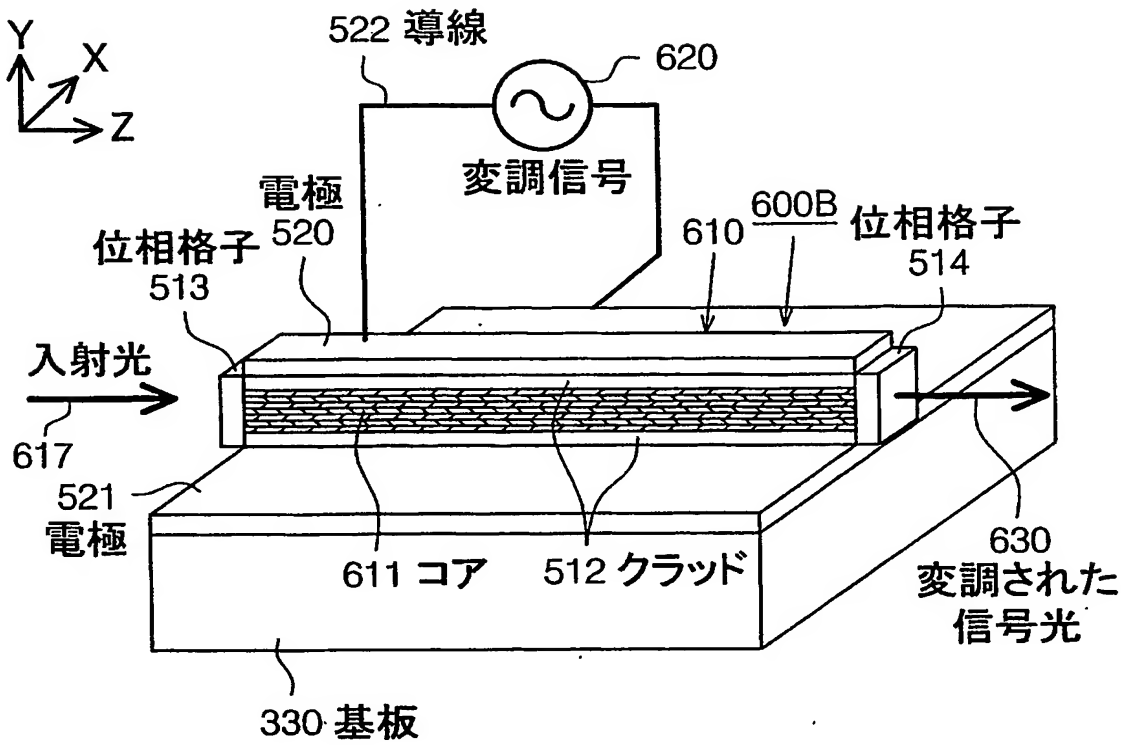


【図 71】

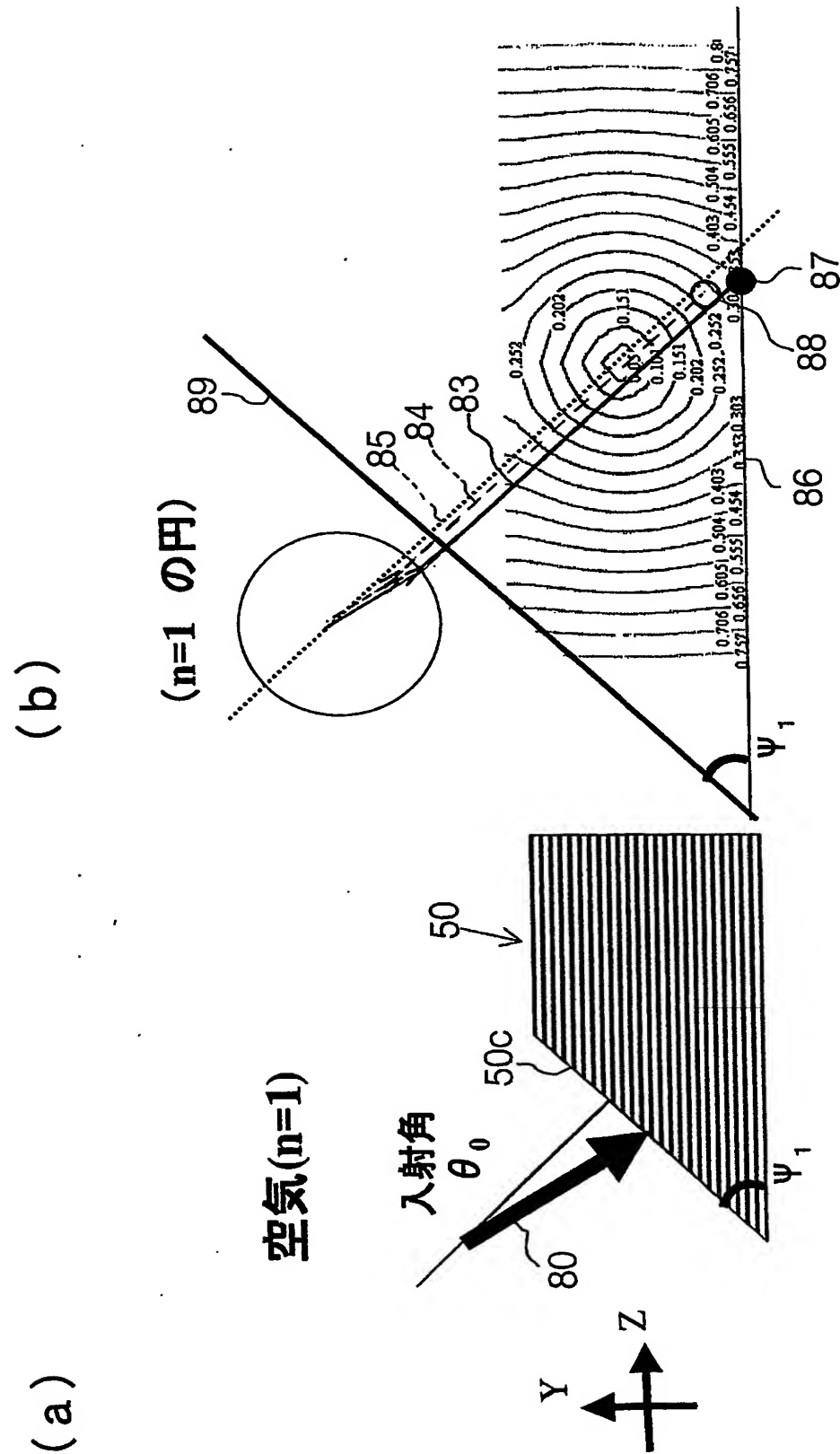




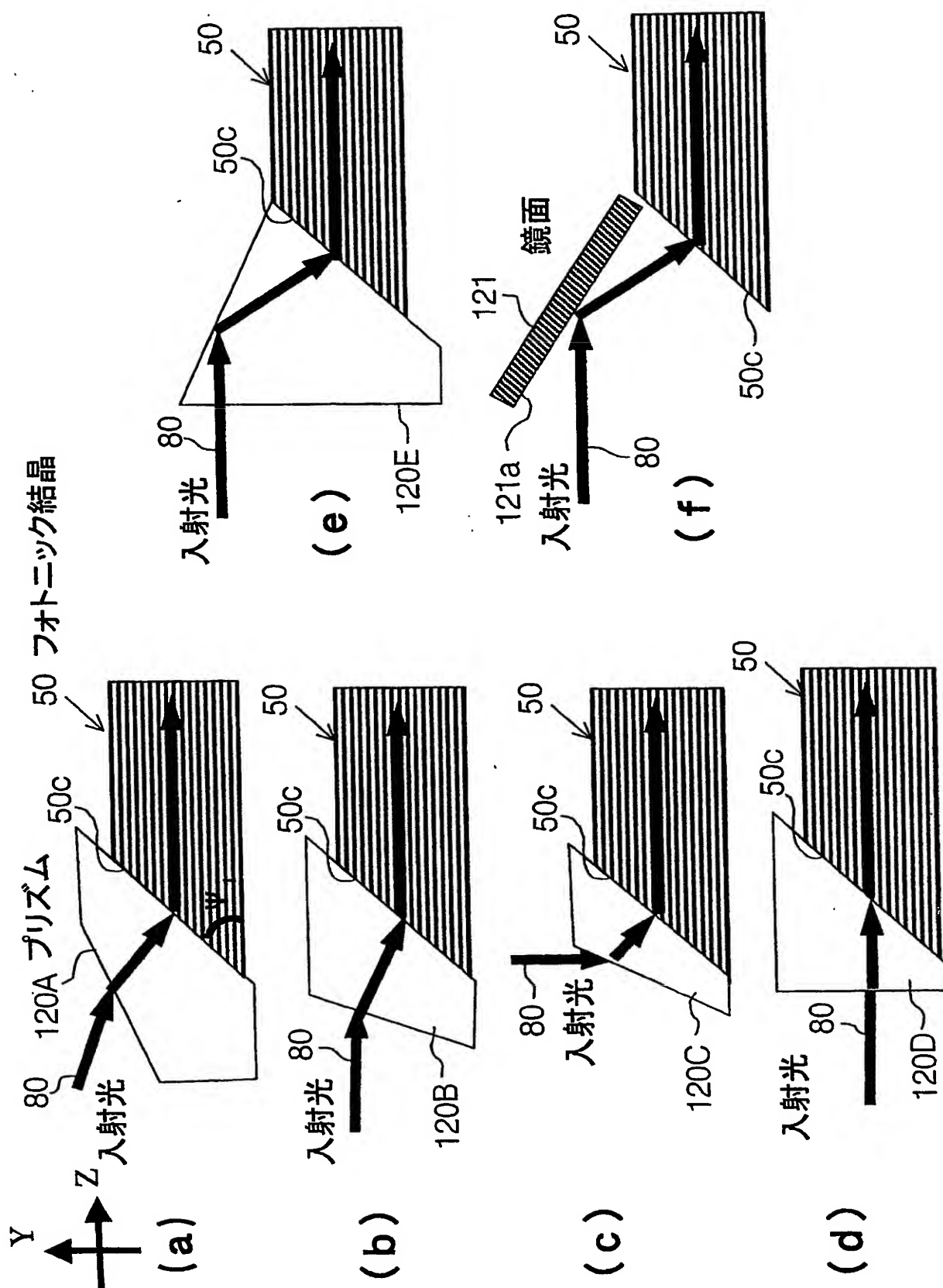
【図 7 2】



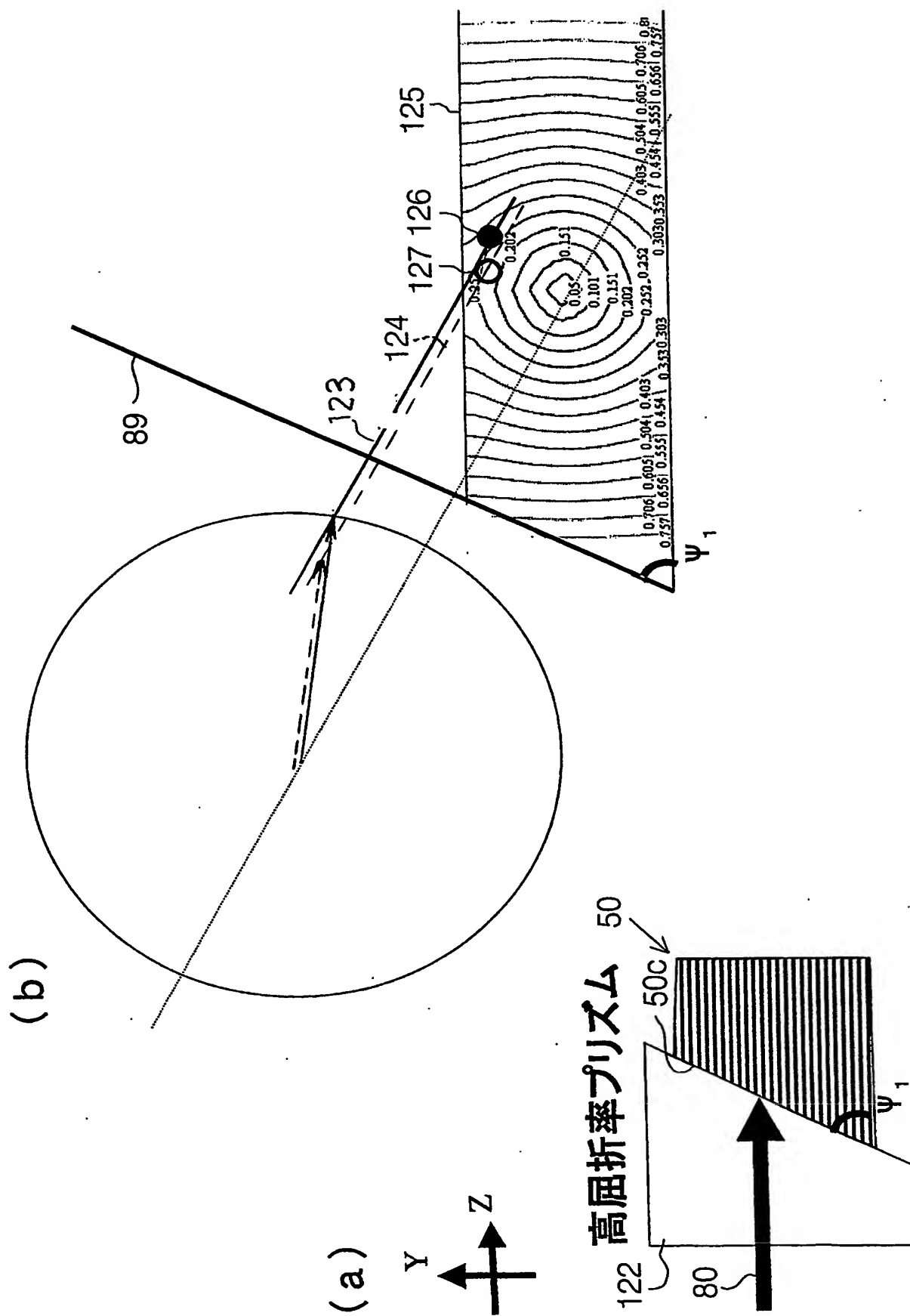
【図 7 3】



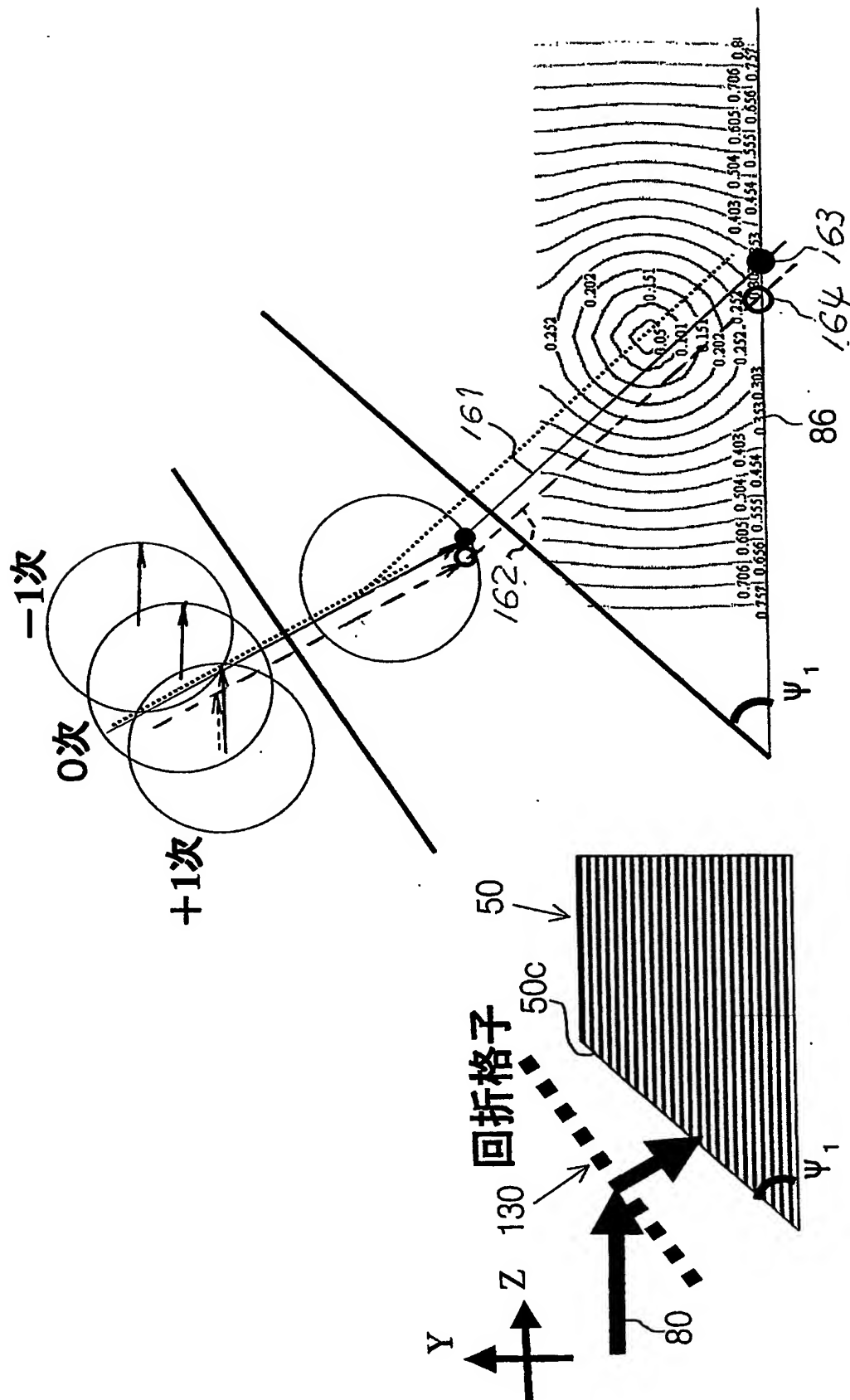
【図74】



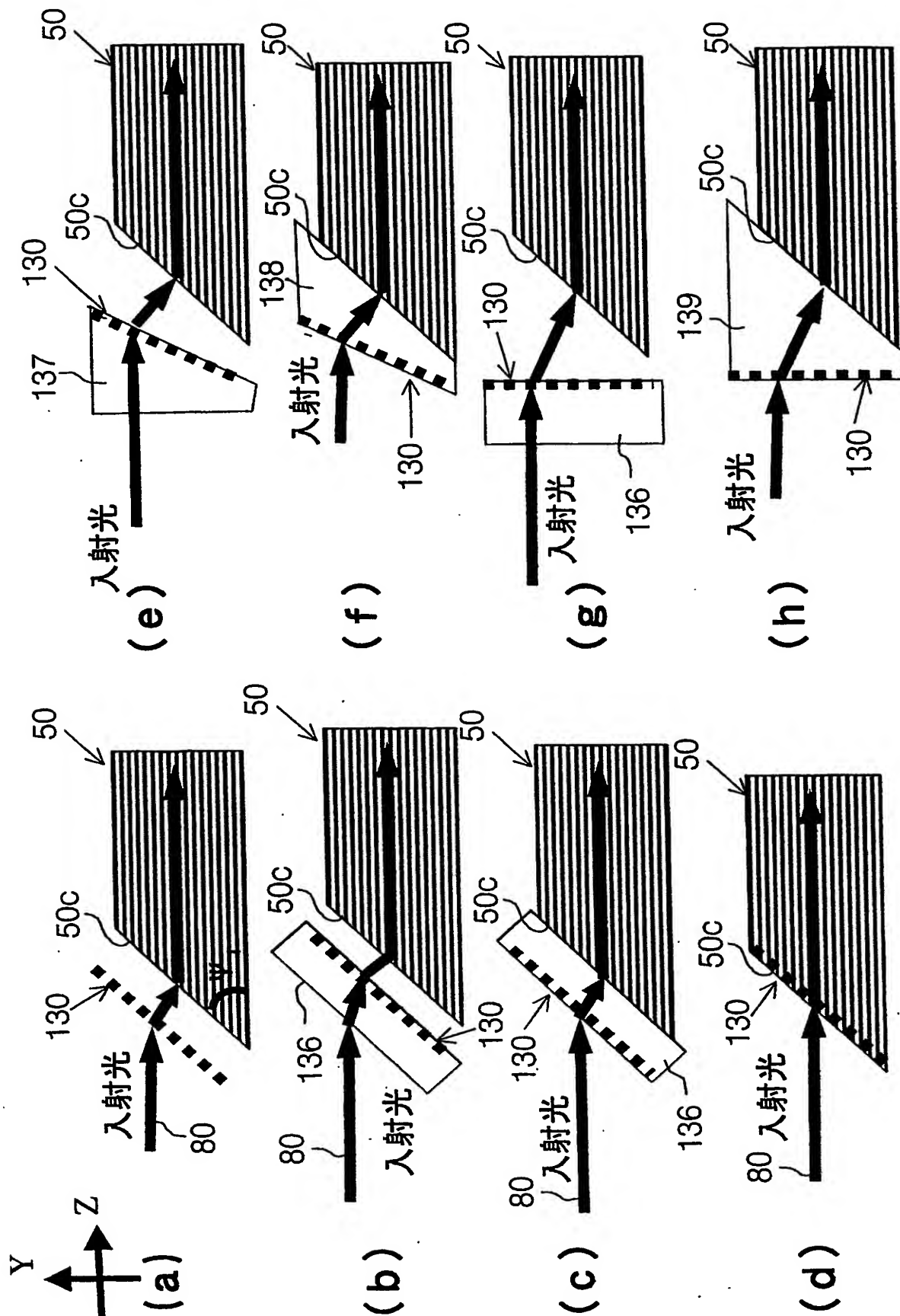
【圖 7 5】



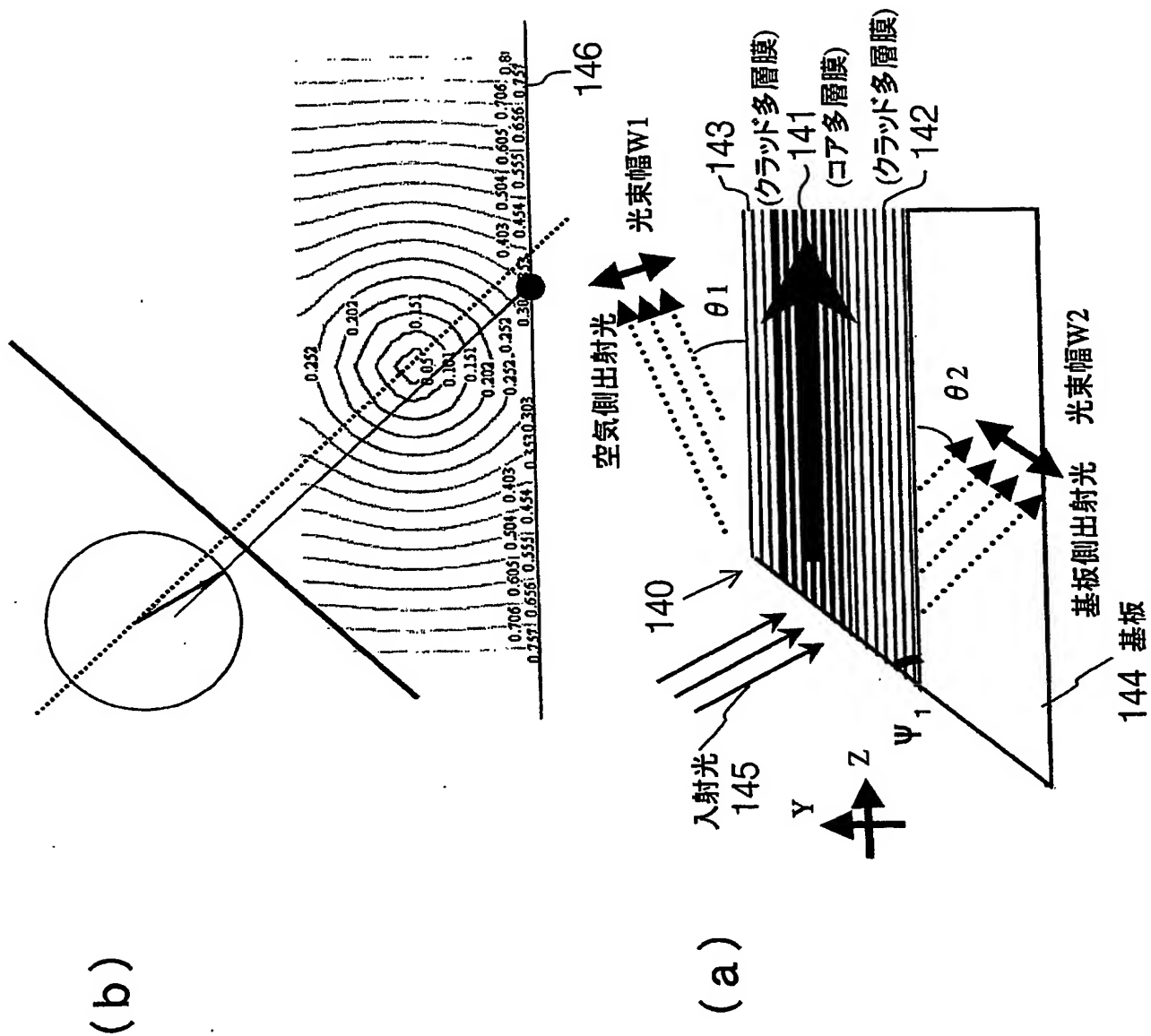
【图 7 6】



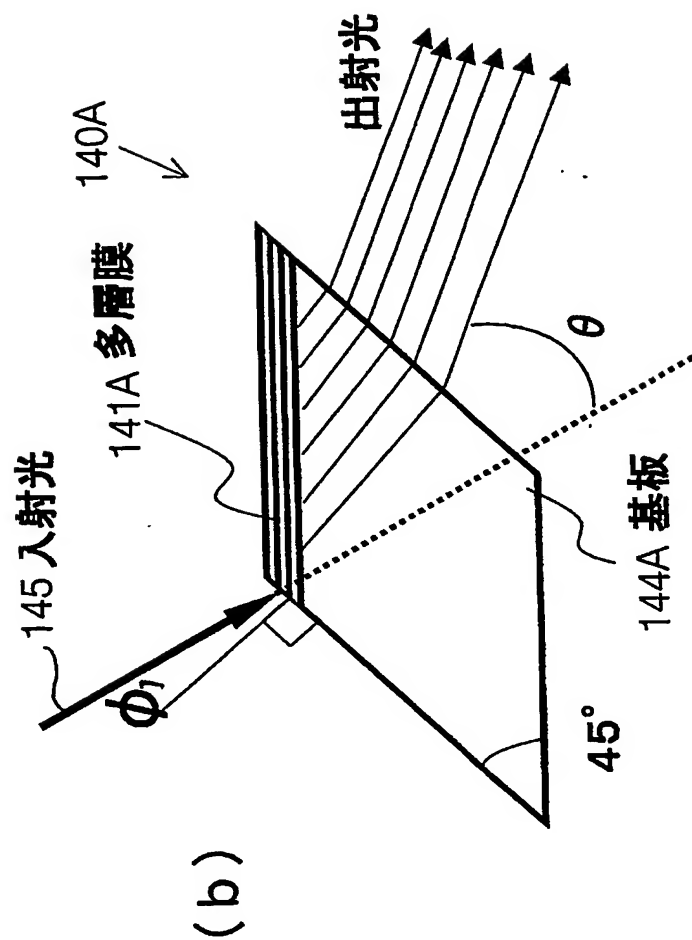
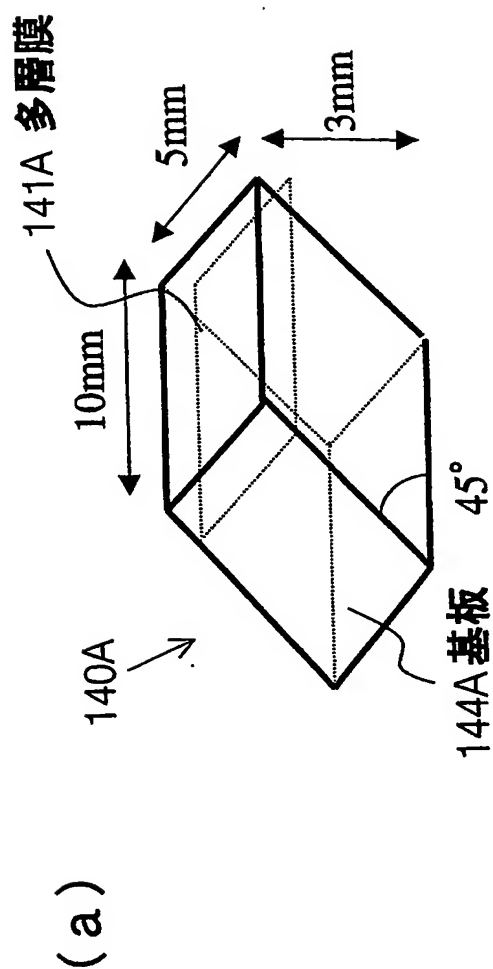
【図 77】



【图 7 8】

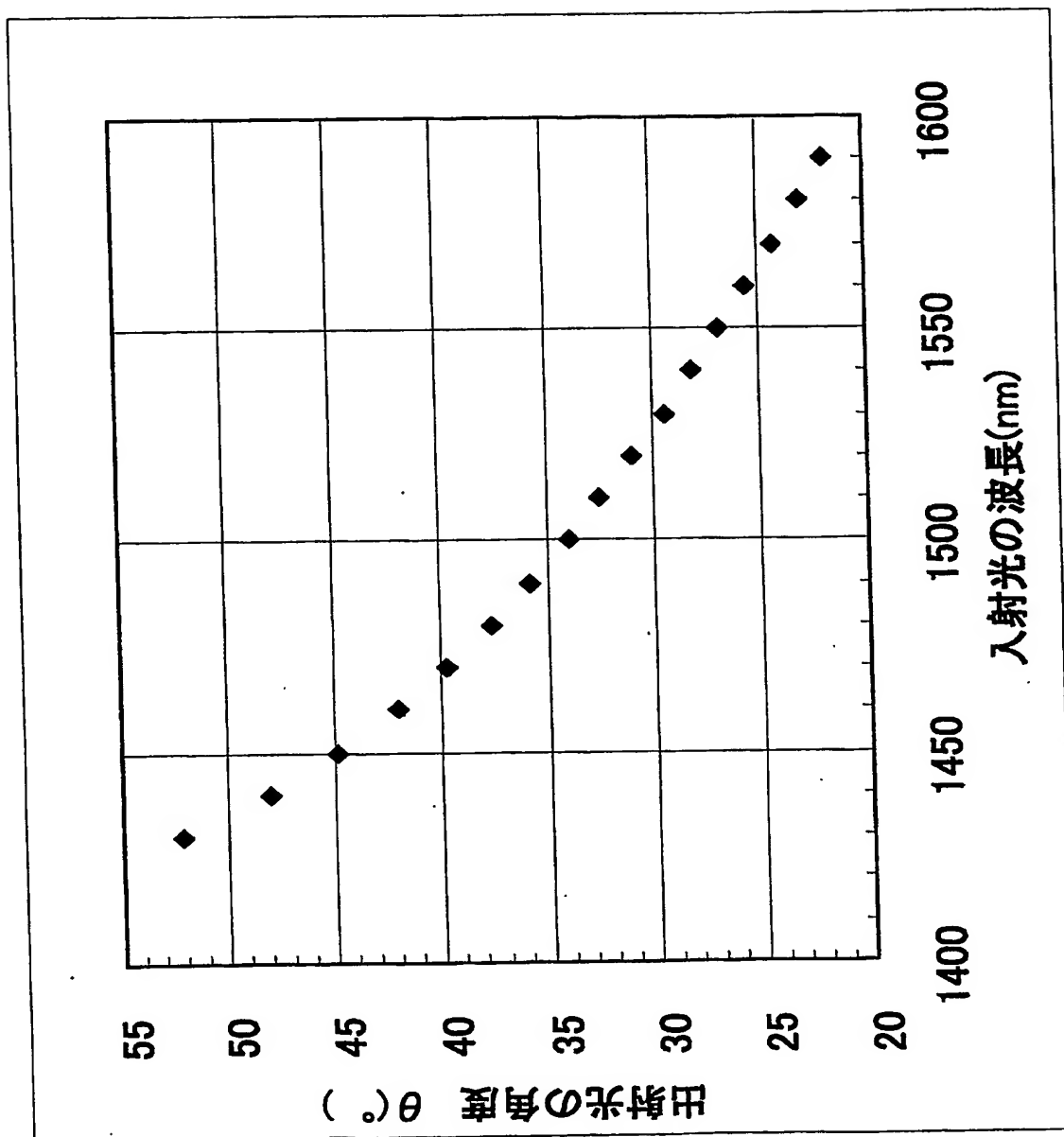


【図 79】

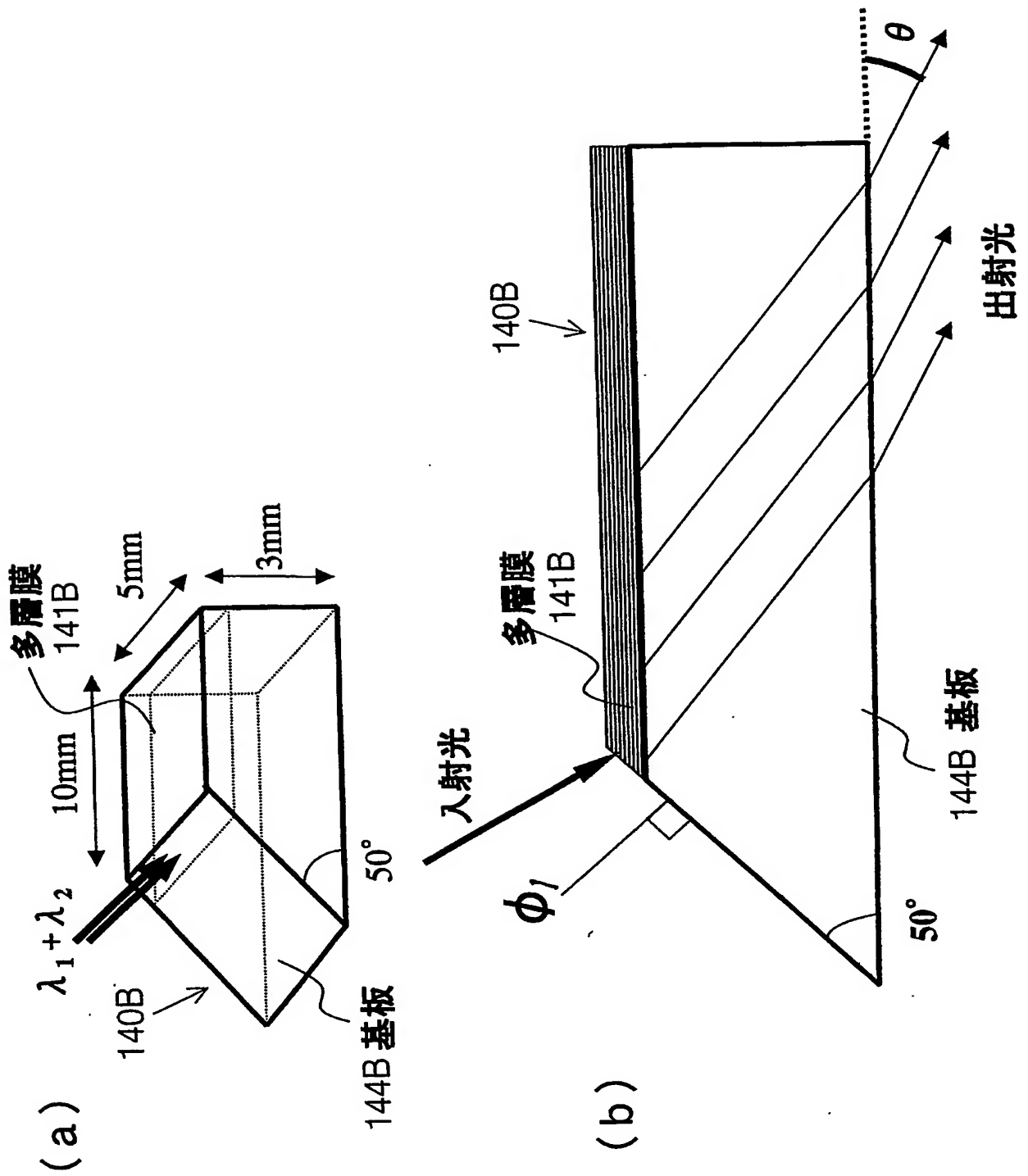




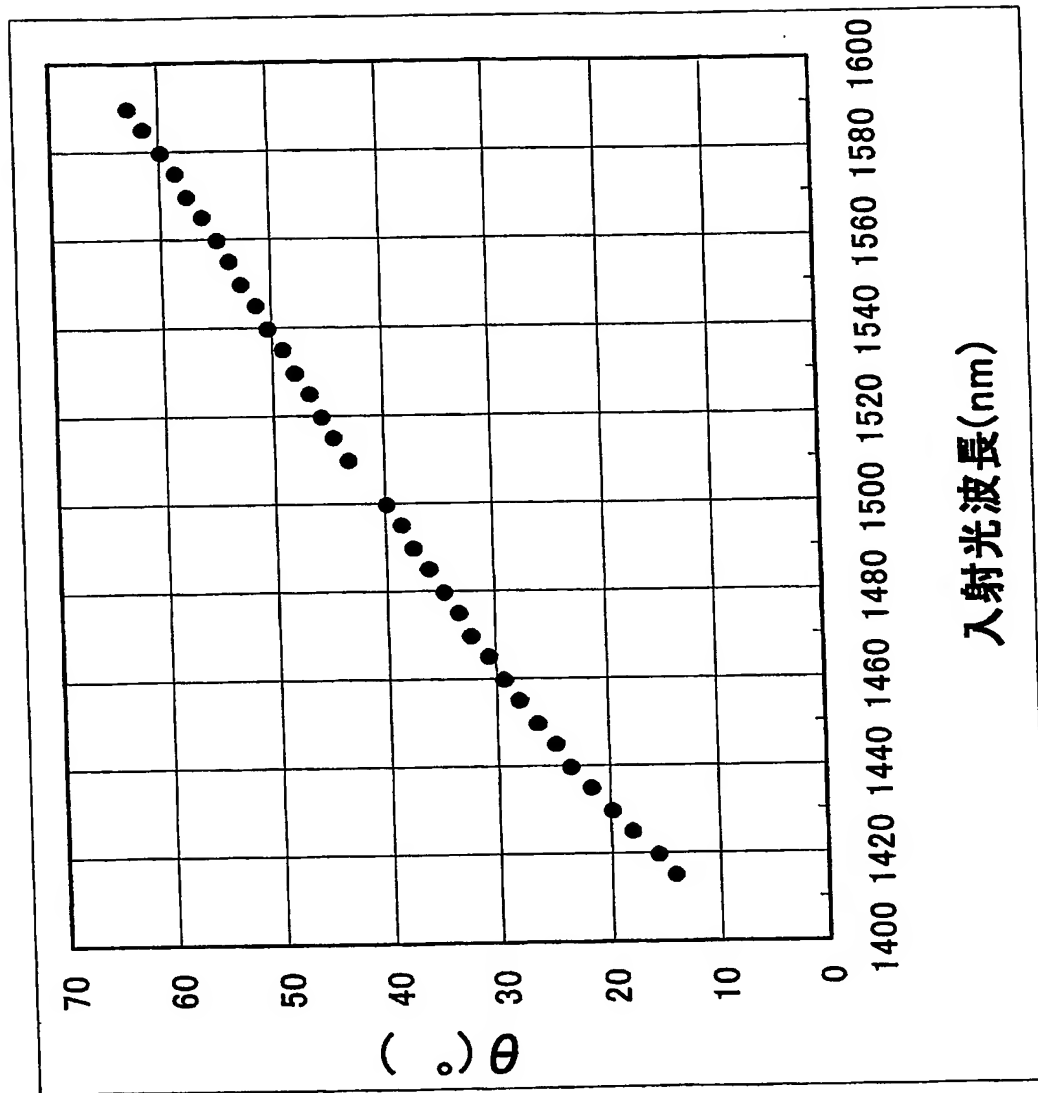
【図 80】



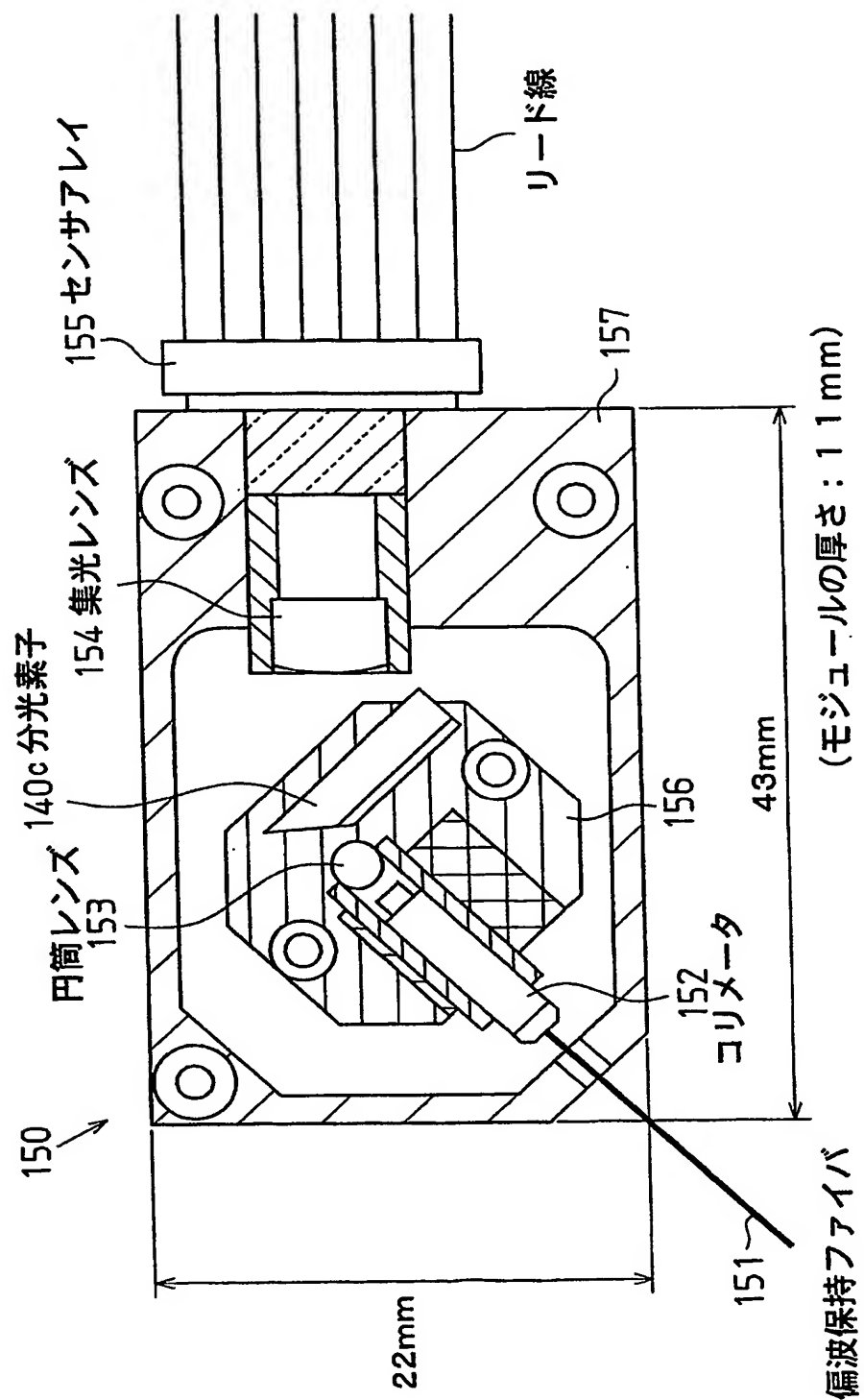
【図 81】



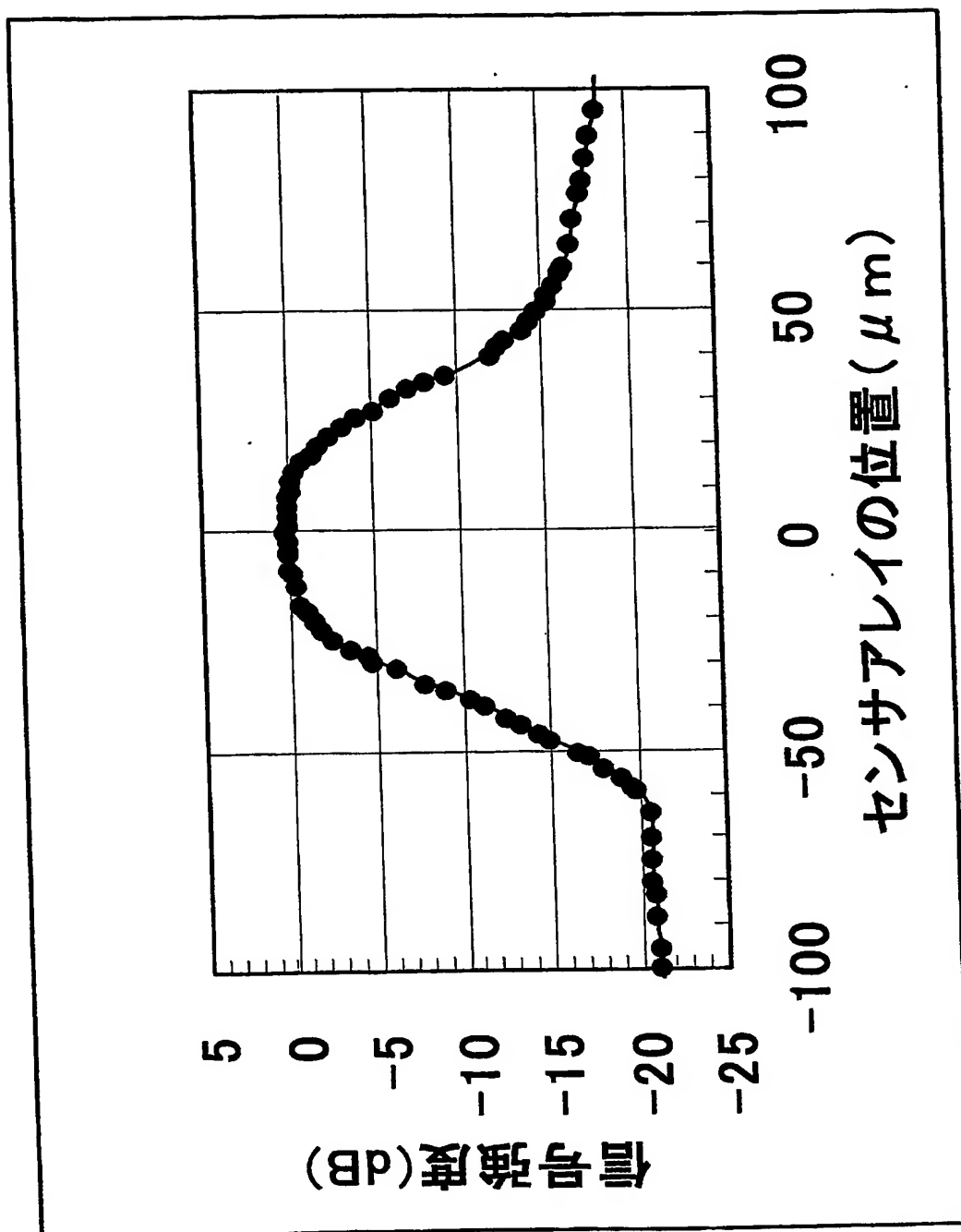
【図 82】



【図 83】



【図 84】



## 【書類名】 要約書

## 【要約】

【課題】 急激曲げや自由な角度での配置が可能で、かつ低伝播損失のフォトニック結晶導波路、均質媒体導波路、およびこれらを用いた光学素子を提供すること。

【解決手段】 Y方向に周期性のあるフォトニック結晶50で構成されたコアを有するフォトニック結晶導波路200である。電磁波はコアのフォトニックバンド構造におけるブリルアンゾーンの境界線上のバンドによって伝播し、コアのY方向と平行な側面は屈折率が $n_s$ の均質媒体と接し、電磁波の真空中での波長を $\lambda_0$ 、フォトニック結晶の周期を $a$ 、コア内を伝播する波動のXZ平面方向の周期を $\lambda$ とし、 $\lambda_0/n_s > a\lambda / (\lambda^2/4 + a^2)$ の条件を満たす。この条件は、フォトニック結晶導波路200の側面から漏れ光が生じないようにする最低限必要な条件で、これを満たすことでコア内を伝播する波動を伝播角 $\phi = 0^\circ$ の場合に側面で閉じ込めることができる。

【選択図】 図29

特願 2 0 0 4 - 0 6 3 2 6 0

出 願 人 履 歴 情 報

識別番号 [ 0 0 0 0 0 4 0 0 8 ]

1. 変更年月日 2 0 0 0 年 1 2 月 1 4 日  
[変更理由] 住所変更  
住 所 大阪府大阪市中央区北浜四丁目 7 番 2 8 号  
氏 名 日本板硝子株式会社
2. 変更年月日 2 0 0 4 年 7 月 1 日  
[変更理由] 住所変更  
住 所 東京都港区海岸二丁目 1 番 7 号  
氏 名 日本板硝子株式会社

**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning  
Operations and is not part of the Official Record**

**BEST AVAILABLE IMAGES**

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

- ☐ BLACK BORDERS
- ☐ IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES
- ☐ FADED TEXT OR DRAWING
- ☐ BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING
- ☐ SKEWED/SLANTED IMAGES
- ☐ COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS
- ☐ GRAY SCALE DOCUMENTS
- ☐ LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT
- ☒ REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY
- ☐ OTHER: \_\_\_\_\_

**IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.**

**As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.**